Série A, n° 3460
N° d'ordre : 4332

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

LOUIS PONS

Première thèse

Étude de certains exemples de l'influence du frottement sec et lubrifié sur la modification des couches superficielles des métaux

Deuxième thèse

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

soutenues le 29 avril 1960 devant la commission d'examen

MM. LAFFITTE..... *Président.*
TRILLAT..... } *Examinateurs.*
FRIEDEL..... }

PUBLIÉ PAR

LA REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE
ET ANNALES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES
Vol. XV, 1960, n° 10, p. 1480 à 1542.

—

PARIS

1960

Série A, n° 3460
N° d'ordre : 4332

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

LOUIS PONS

Première thèse

Étude de certains exemples de l'influence du frottement sec et lubrifié sur la modification des couches superficielles des métaux

Deuxième thèse

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

soutenues le 29 avril 1960 devant la commission d'examen

MM. LAFFITTE..... *Président.*
TRILLAT..... } *Examinateurs.*
FRIEDEL..... }

PUBLIÉ PAR

LA REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE
ET ANNALES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES
Vol. XV, 1960, n° 10, p. 1480 à 1542.

—

PARIS

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

PROFESSEURS

Doyen..... J. PÉRÈS.

G. JULIA	T	Analyse sup. et Algèbre sup.
DE BROGLIE	T	Théories physiques.
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées.
PÉRÈS	T	Mécanique des fluides et Applic.
BARRABÉ	T	Géol. structurale et Géol. appl.
BOURCART	T	Géog. physique et Géol. dynamique.
PLANTEFOL	T	Botanique.
GRASSÉ	T	Évolution des êtres organisés.
PRÉVOST	T	Chimie organique.
BOULIGAND	T	Applic. de l'analyse à la Géométrie.
CHAUDRON	T	Chimie appliquée.
WYART	T	Minéralogie.
TEISSIER	T	Zoologie.
MANGENOT	T	Biologie végétale.
P. AUGER	T	Physique quantique et Relativité.
MONNIER	T	Physiologie générale.
PIVETEAU	T	Paléontologie.
ROCARD	T	Physique (E.N.S.).
H. CARTAN	T	Mathématiques (E.N.S.).
LAFFITTE	T	Chimie générale.
FAVARD	T	Géométrie supérieure.
COULOMB	T	Physique du Globe.
Mlle COUSIN	T	Biol. animale (S.P.C.N.).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.
P. DRACH	T	Zoologie.
KASTLER	T	Physique (E.N.S.).
EPHRUSSI	T	Génétique.
WURMSER	T	Biol. physico-chimique.
RIVIÈRE	T	Géol. (S.P.C.N.) Orsay.
GAUTHERET	T	Biol. végétale (P.C.B.).
LUCAS	T	Recherches physiques.
A. THOMAS	T	Biologie cellulaire.
ARNULF	T	Optique appliquée.
M. MORAND	T	Enseignement de Physique.
SOLEILLET	T	Physique (P.C.B.).
FORTIER	T	Mécan. expérimentale des fluides.
DANJON	T	Astronomie.
PETIT	T	Biologie maritime.
QUENEY	T	Météorologie et Dynamique atm.
GALLIEN	T	Embryologie.
EICHHORN	T	Biol. végétale (S.P.C.N.).
DE CUGNAC	T	Biol. végétale (S.P.C.N.).
Mlle CAUCHOIS	T	Chimie physique.
THELLIER	T	Physique du Globe.
L'HÉRITIER	T	Génétique.
GRIVET	T	Radio-électricité.
PONCIN	T	Mécanique générale.
DUBREIL	T	Arithm et Theorie des nombres.
QUELET	T	Chimie organique.
CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
CHAMPETIER	T	Chimie macromolécul.
CUVILLIER	T	Micropaléontologie.
JUNG	T	Pétrographie.
TRILLAT	T	Microscopie et diffraction élect.
WIEMANN	T	Chimie organique et structurale.
JACQUINOT	T	Spectroscopie et Physique céleste.
VASSY	T	Physique de l'atmosph.
DESTOUCHES	T	Théories physiques.
M. PRUVOST	T	Géologie.
AMIEL	T	Chimie générale.
HOCART	T	Minéralogie.
J.-P. MATHIEU	T	Physique (option) Orsay.
COUTEAUX	T	Biol. animale (P.C.B.).
MAY	T	Zoologie (Orsay).
CHOQUET	T	Théor. des fonct. et Topologie.
FELDMANN	T	Biol. végétale marine.
GUINIER	T	Physique des solides.
JOST	T	Physiologie comparée.
FORTET	T	Calcul des prob. et Phys. math.
SCHWARTZ	T	Calcul diff. et Intégr.
CHOUARD	T	Physiologie végétale.
MALAVARD	T	Aviation.
BRELOT	T	Calcul différentiel.
NORMANT	T	Synthèse organique.
BÉNARD	T	Chimie minérale.
BUVAT	T	Botanique (E.N.S.).
DUGUÉ	T	Statistiques mathémat.
GELOSO	T	Chimie (S.P.C.N.).
SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
ULRICH	T	Physiologie végétale.
MARÉCHAL	T	Optique théor. et appl.
KIRRMANN	T	Théories chimiques.
CHADEFAUD	T	Botanique.
Mlle LE BRETON	T	Physiologie générale.
SALEM	T	Mathématiques génér.
LELONG	T	Mathématiques génér.
DEVILLERS	T	Anat. et Histol. comp.
EHRESMANN	T	Topologie algébrique.
FRANÇON	T	Physique (S.P.C.N.).
GLANGEAUD	T	Géog. physique et Géol. dynam.
GODEMENT	T	Mathématiques (M.G.P.).
PISOT	T	Technique mathém. de la Phys.
E. ROCH	T	Géologie.
SCHATZMANN	T	Astrophysique.
TERMIER	T	Paléontologie stratigr.
ZAMANSKY	T	Mathématiques génér.
LENNUIER	T	Physique (M. G. P.).
RIZET		Génétique.
ROUTHIER	T	Géologie appliquée.
Mme TONNELAT	T	Relativité.
DIXMIER	T	Mathématiques (M.P.C.).
SOUCHAY	T	Chimie générale.
AIGRAIN	T	Electrotechnique génér.
BRUSSET		Chimie minerale.
M. LÉVY	T	Phys. théorique des hautes énerg.
Mme CHAIX		Chimie biologique.
Mme HUREL-PY		Biol. végétale (P.C.B.).
PIAUX		Chimie (M. P. C.).
BRUN	T	Méc. expér. des fluides.
LEDERER	T	Chimie biologique
Mme DUBREIL	T	Mathématiques.
Mme LELONG	T	Mathématiques (E.N.S.).
BELLAIR	T	Géologie (S. P. C. N.).
COTTE	T	Physique (Orsay).
J. E. DUBOIS	T	Chimie organique.
LAMOTTE		Zoologie (E. N. S.).
MICHEL ANDRÉ	T	Chimie (S. P. C. N.).
OLMER	T	Énergétique générale.
ROUAULT	T	Physique générale.
GAUTHIER	T	Méc. appliquée.
BARCHEWITZ	T	Chimie physique.
BROSSEL	T	Physique atomique.
BUSER		Physiol. comparée.
CAMUS		Physiol. vég. (3e cycl.).
CASTAING		Phys. générale.
CURIEN		Minéralogie et Cristall.
MOYSE	T	Physiologie végétale (Orsay).
PANNETIER		Chimie (S. P. C. N.).
POSSOMPES	T	Zoologie.
PULLMANN		Chimie théorique.
TEILLAC		Phys. nucléaire et Radioactivité.
TONNELAT		Biol. physico-chimique.
VILLE	T	Économétrie.
WILLEMART		Chimie (P. C. B.).
DODÉ	T	Chimie (S. P. C. N.) Orsay.
FREYMANN	T	Physique générale.
GUINOCHET	T	Biol. vég. (Orsay).
ROLLET	T	Chimie (P. C. B.).
Mlle JOSIEN	T	Chimie (P. C. B.).
CHEVALLEY	T	Géom algébr. et théor. des gr.
ARNOULT	T	Électronique.
CHAPELLE	T	Physique (M.P.C.) Orsay.
DELANGE	T	Mathématiques (Orsay)
DENY	T	Mathém. (M.G.P.).
GERMAIN	T	Mécanique théorique des fluides.
G. LUCAS	T	Géologie.
ALLARD		Chimie physique.
BERTHELOT		Phys. nucl. et Radioactivité.
BRICART		Météor. et Phys. de l'atmosphère.
Mme ALBE-FESSARD		Psycho-physiol.
FRIEDEL		Physique des solides.
M. JULIA		Étude des molécules organ. compl.
LENDER		Biol. animale (S.P.C.N.) Orsay.
MAGAT		Phys.-chim. des rayonn.
Mlle QUINTIN	T	Électrochimie
MONOT	T	Chimie du métabolisme.
BENOIT	T	Physiologie animale.
DE POSSEL	T	Analyse numérique.
CHARLOT	T	Chimie analytique.
HAÏSSINSKY	T	Radiochimie
LEMÉE	T	Physiologie (B.M.P.V.).
GUÉRIN	T	Chimie (M.P.C.).

Secrétaire général..... C. MONIER.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

En terminant ce travail je remercie tout particulièrement M. FRIEDEL, professeur à la Sorbonne, pour le bienveillant intérêt avec lequel il a suivi mes recherches en m'encourageant à développer l'étude des déformations en relation avec les structures.

Que M. TRILLAT, membre de l'Académie des Sciences, et M. LAFFITTE, professeur à la Sorbonne, veuillent bien accepter l'expression de mes remerciements pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de faire partie du jury de ma thèse.

J'exprime ma profonde gratitude à M. MERIGOUX, professeur à la Faculté des Sciences de Marseille, qui m'enseigna la physique avec ses collaborateurs, MM. BRIN et JOUTY ;
à M. le Dr et Mme BUCKIE qui me permirent d'aborder ce travail en m'enseignant la métallographie et la pratique de la microdureté, et de profiter ensuite de leurs conseils.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance :
à M. NAVARRE, président directeur général de l'*Institut Français du Pétrole*, qui a donné l'hospitalité à ce travail ;
à M. COURTEL, conseiller scientifique à l'*Institut Français du Pétrole*, qui m'a proposé ces sujets de recherches et m'a prodigué journellement ses conseils ;
à M. LARBRE, pour ses précieux encouragements.
à MM. DESCAMPS, HENRY, JAOUL, PLATEAU, SEBILLEAU et TOUCHARD qui voulurent bien m'apporter leur précieuse collaboration.

Je remercie particulièrement MM. Paul PARTIOT, directeur des *Ateliers Partiot-Cementation*, et DESBRANDES qui m'aidèrent à réaliser ce travail, ainsi que mes collaborateurs, MM. EGLI et CHEVILLON.

Que Mme FUNCK, directrice de la division documentation de l'*Institut Français du Pétrole*, qui voulut bien m'apporter son aide dans l'impression de ce travail, trouve ici, avec ses collaborateurs, l'hommage de toute ma gratitude.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

A. Définitions et généralités 5

B. Historique 6
1. Travaux de Bowden 6
2. Travaux de Crook et de Welsh 6
3. Travaux de Pomey 10

C. Objet de ce travail 10

II. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES. PRÉCISION DES MESURES

A. Appareil de frottement 12
Pièces de frottement : dimensions et mouvement 12
Charge appliquée 14
Coefficient de frottement 14
Travail dû au frottement 15
Usure 15
Lubrification des éprouvettes 15
Mesure des températures 15

B. État microgéométrique de surface 15

C. Précision des mesures 16

D. Microdureté 16

III. MATÉRIAUX ET PRÉTRAITEMENT UTILISÉS. MORPHOLOGIE DES COUCHES PRÉTRAITÉES SANS MODIFICATION DUE AU FROTTEMENT

A. Nature des matériaux utilisés 19

B. Étude micrographique des couches traitées sans modification due au frottement 20
1. Réalisation du traitement de surface 20
2. Technique de préparation des surfaces métallographiques 22
3. Examen de la couche superficielle d'apport 22
4. Étude de la zone de diffusion 23

C. Étude microsclérométrique de l'influence des conditions de refroidissement succédant à l'immersion des pièces traitées 27

IV. RELATIONS ENTRE LA STRUCTURE SUPERFICIELLE ET LES PROPRIÉTÉS DE FROTTEMENT

A. Essais avec lubrifiants 32
1. Évolution du relief microgéométrique 32
2. Comportement de la couche superficielle 33
3. Conclusion des essais avec lubrifiant 37

B. Essais à sec 38
1. Variation de f avec la vitesse et la charge 38
2. Variation de f au cours du mouvement 44
3. Évolution de l'usure 44
4. Conclusion des essais à sec 44

V. RELATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS DE FROTTEMENT ET LA STRUCTURE DES COUCHES SOUS-JACENTES A LA SURFACE

A. Essais avec lubrifiant 45
1. Déformations produites au cours du frottement 45
2. Durcissement produit au cours du frottement 46
3. Recherche de l'influence de l'échauffement sur le durcissement 49
4. Conclusion 52

B. Essais à sec 56
1. Essais de roulement et de roulement et glissement 56
2. Essais de glissement pur 57

CONCLUSION GÉNÉRALE 65

BIBLIOGRAPHIE 66

I. INTRODUCTION

A. DÉFINITIONS ET GÉNÉRALITÉS

Il est connu qu'on ne peut indépendamment considérer, lorsque des pièces mécaniques sont en mouvement relatif, d'un côté le lubrifiant qui a, entre autres, le double rôle de réduire le frottement et d'évacuer la chaleur produite par lui, de l'autre la matière, la forme, les propriétés mécaniques des organes eux-mêmes (1).

Les questions de frottement sont nécessairement complexes du fait du grand nombre de paramètres qu'elles font intervenir, certains de ces paramètres étant encore mal définis parce que mal mesurés (on pense, par exemple, à la définition des surfaces). D'autre part, elles font appel à des disciplines et à des techniques multiples, la mécanique, la mécanique des fluides, la métallurgie, la cristallographie, pour n'en citer que certaines, et également la chimie.

Il convient de donner quelques définitions qui préciseront, en particulier, bien que cette première distinction paraisse intuitive, ce que nous entendons par frottement « sec » et frottement « lubrifié ».

Nous conviendrons d'appeler frottement « lubrifié », ou frottement avec lubrifiant, celui qui dans un mécanisme est facilité par un moyen d'apport et un corps d'origine extérieure, quel que soit celui-ci, huile ou graisse, fluide ou solide.

Au contraire, nous désignerons conventionnellement par frottement « sec » celui d'un mécanisme dans lequel aucun lubrifiant n'est introduit.

Il faut bien noter que ceci est une pure convention, destinée seulement à faciliter l'exposé. En effet, une partie de ce texte même portera sur l'examen d'un cas où le frottement « sec » peut lui-même être autolubrifiant (2). D'ailleurs, une surface métallique à l'air libre n'est jamais exempte de toute contamination, ce qui peut influer sur le frottement. Ainsi, J. J. Trillat a montré (3) par diffraction d'électrons que des films de matières grasses provenant de l'atmosphère sont susceptibles de se former spontanément sur les surfaces.

En second lieu, on entendra par grippage le phénomène brutal qui se traduit par une élévation subite et très grande du frottement, et qui peut être accompagné d'une soudure des surfaces en contact, bloquant le mécanisme.

Il faut cependant rappeler, comme l'a admis Bowden (4), que le frottement sec lui-même est déjà provoqué par des soudures et une suite de cisaillements à l'échelle microscopique ou submicroscopique, le coefficient de frottement que l'on mesure étant relié simplement à la force de cisaillement nécessaire pour rompre les soudures provoquées.

Lorsque aucun contact n'a lieu entre les surfaces elles-mêmes et que le film de lubrifiant liquide a une épaisseur suffisante, ce cisaillement se produit dans le lubrifiant et le frottement peut être considérablement réduit (régime hydrodynamique). Si ce film existe mais est trop mince (épillamen) (5) pour assurer le régime hydrodynamique, certaines aspérités microgéométriques des surfaces peuvent entrer en contact : il y a un frottement non négligeable qui dépend ici essentiellement de l'adhérence du film au métal ou aux métaux accouplés (des réactions chimiques pouvant d'ailleurs intervenir entre le métal et le lubrifiant), et également du relief à l'échelle microscopique des surfaces. Dans la pratique, ce second régime peut être qualifié soit de régime « onctueux » (vitesses faibles), soit de régime « extrême-pression » (charges spécifiques élevées).

Pour permettre des conditions de frottement sévères sans détérioration rapide des surfaces en

contact, une méthode consiste à agir sur la structure superficielle du métal par un traitement approprié. Ce traitement peut consister par exemple en la formation d'un composé chimique en surface, ou en une diffusion d'éléments qui modifient les propriétés mécaniques du métal sur une certaine profondeur (prétraitement).

B. HISTORIQUE

1. Travaux de Bowden.

F. BOWDEN (4) a montré que les propriétés de frottement de deux surfaces en contact dépendaient de leur nature chimique et physique :

— deux surfaces de même nature chimique grippent plus facilement que si elles sont de natures différentes ;

— un film métallique mou, ou un film orienté sur un support métallique dur, peut favoriser l'aptitude au glissement sans grippage.

2. Travaux de Crook et de Welsh.

Le calcul montre que les efforts de cisaillement développés dans les couches superficielles, pour un des cas particuliers que nous avons étudié (disques en contact sous une certaine charge), sont maximaux non pas en surface, mais à une certaine profondeur.

Ceci découle de la théorie de HERTZ et a été repris récemment par R. BEECHING et W. NICHOLLS (6).

La théorie classique du cas général de la compression qu'exercent l'un sur l'autre deux corps élastiques en contact est due à HERTZ (1). Si l'on appuie les corps l'un contre l'autre dans la direction normale à leur plan tangent, on peut supposer que la surface de contact aura un contour elliptique si cette surface est petite. HERTZ montre que la répartition des pressions sur la surface de contact est représentée par les ordonnées d'un demi-ellipsoïde dont la base est cette surface.

Connaissant la distribution des pressions, on peut calculer les contraintes en tout point. On peut constater ainsi que le point où agit la contrainte maximale de cisaillement se trouve sur la normale au centre de l'ellipse de contact, à une certaine profondeur dépendant de la grandeur des demi-axes a et b.

En augmentant le rapport $\frac{a}{b}$, on obtient des ellipses de contact de plus en plus étroites ; à la limite $\frac{a}{b}=\infty$, on arrive au cas du contact de deux cylindres dont les axes sont parallèles. La surface de contact devient alors un rectangle étroit. La distribution des pressions q le long de la largeur de la surface de contact est représentée par une demi-ellipse. Nous allons rappeler les formules correspondant à ce cas, qui est celui réalisé dans nos expériences.

Prenons un système de référence $oxyz$ trirectangle, tel que l'axe des x soit la génératrice commune aux deux cylindres et oxy leur plan tangent. Soit P' la charge par unité de longueur de contact et q_0 la pression au centre de la surface de contact ; la distribution des pressions étant semi-elliptique,

(1) Les grandes lignes de cette théorie sont exposées dans l'ouvrage de TIMOSHENKO « Théorie de l'élasticité », p. 370 et suivantes, *Ch. Béranger, édit.*

on a :

$$P' = \frac{1}{2}\pi b q_o$$

d'où :

$$q_o = \frac{2P'}{\pi b}$$

La théorie donne, d'autre part, pour la quantité b l'expression :

$$b = \sqrt{\frac{4P'(k_1 + k_2)R_1R_2}{R_1 + R_2}}$$

où R_1 et R_2 sont les rayons des cylindres et k_1 et k_2 définis par :

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} \qquad k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2}$$

E est le module d'élasticité et ν le coefficient de POISSON.

Si la matière des cylindres est la même et correspond à $\nu = 0{,}3$ (valeur couramment rencontrée), on aura :

$$b = 1{,}52\sqrt{\frac{P'R_1R_2}{E(R_1 + R_2)}}$$

Dans le cas de nos expériences :

$$R_1 = R_2 = R \qquad b = 1{,}08\sqrt{\frac{P'R}{E}}$$

et, portant cette valeur de b dans l'expression de q_o, on trouve :

$$q_o = 0{,}173\sqrt{\frac{P'E}{R}}$$

q_o et b étant connus, la théorie déjà mentionnée permet de calculer les contraintes en tout point de la zone de compression.

Ce calcul montre que le point qui supporte la contrainte de cisaillement maximal est à une certaine profondeur z_1.

La figure 1, d'après BELAJEFF, représente la variation des contraintes principales suivant la profondeur du point considéré et, pour $\nu = 0{,}3$, la contrainte maximale de cisaillement se produit à la profondeur $z_1 = 0{,}78\ b$ et sa grandeur est $0{,}304\ q_o$.

A. W. CROOK (7) puis N. C. WELSH (8) ont étudié le roulement ainsi que le mouvement composé du roulement et du glissement de deux disques l'un sur l'autre en frottement lubrifié. Ils ont pu, d'une part, grâce à l'observation métallographique de la section des disques après essai, d'autre part, grâce à des mesures microsclé-

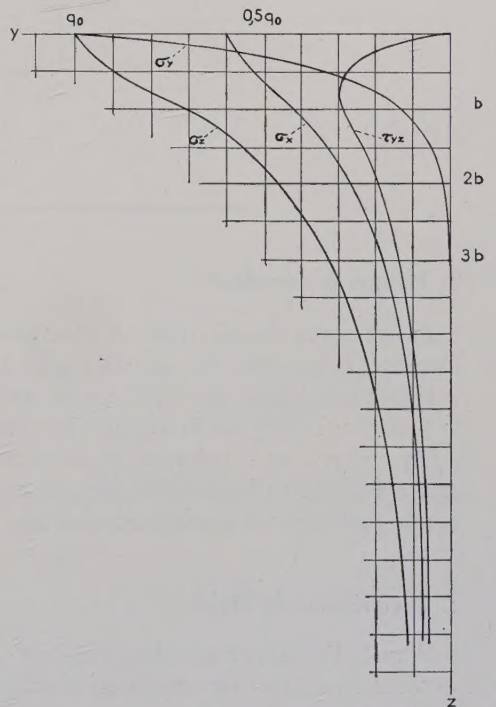


FIG. 1. — σ_x, σ_y, σ_z = contraintes principales.

$$\tau_{yz} = \frac{1}{2}(\sigma z - \sigma y)$$

rométriques, localiser le maximum des déformations et la théorie précédente explique une partie de leurs résultats mais ne les satisfait pas entièrement.

1. Données pratiques des expériences de Welsh.

WELSH utilise un couple de disques en acier demi-dur de 81,2 mm de diamètre :

— lorsqu'ils roulent avec un glissement relatif, leurs vitesses périphériques sont respectivement de 600 cm/s et 900 cm/s. Les disques sont mis en route progressivement, la charge appliquée est également progressive jusqu'à un maximum de 80 kg par centimètre de longueur de contact.

Le disque le plus rapide accomplit $4 \cdot 10^6$ tr dont 54 000 à la charge maximale.

— lorsqu'ils roulent seulement, l'un des deux disques est entraîné par l'autre à 1 500 tr/mn. La charge est portée jusqu'à 107 kg par centimètre de longueur de contact et les deux disques roulent avec la vitesse périphérique de 600 cm/s pendant 495 000 tr au total.

Le tableau suivant résume les données :

	ROULEMENT ET GLISSEMENT	ROULEMENT SEUL
Vitesse périphérique ... (cm/s)	900 600	600
Nombre de tours totaux.	$4 \cdot 10^6$ dont $54 \cdot 10^3$ à la charge maximale	495 000
Charge maximale (kg) par centimètre de contact	80	107

2. Mesures de microdureté.

Les mesures de microdureté effectuées depuis la surface libre sous des charges de 30 à 100 g donnent les courbes des figures 2 *a* et 2 *b*.

Il faut remarquer que, alors que les autres mesures ont toutes été faites sur les sections de disques, la première l'a été sur la surface de frottement elle-même.

On observe un maximum de la microdureté à une certaine profondeur. Ce maximum et cette profondeur sont compatibles avec les calculs de BEECHING et NICHOLLS. Il est plus grand dans le cas de roulement et glissement que dans le cas de roulement seul.

3. Interprétation de Welsh.

D'après l'observation micrographique, le déplacement de matière au-dessous et à proximité des surfaces de contact est celui représenté par les figures 3 *a* et 3 *b*.

L'origine des forces responsables du déplacement en avant est incertaine. CROOK (7) postulait que, afin de palier les variations de la section transversale du volume unitaire traversant la zone de contact, la vitesse tangentielle augmente causant un cisaillement en avant.

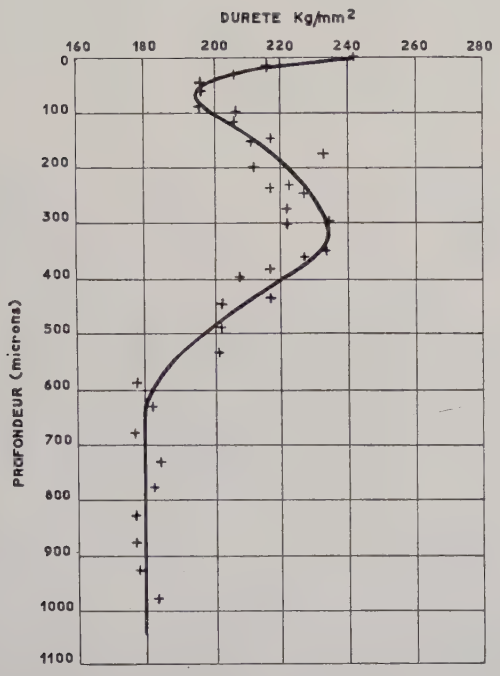


FIG. 2 *a*. — Relation entre dureté et profondeur pour deux disques dans le cas du roulement.

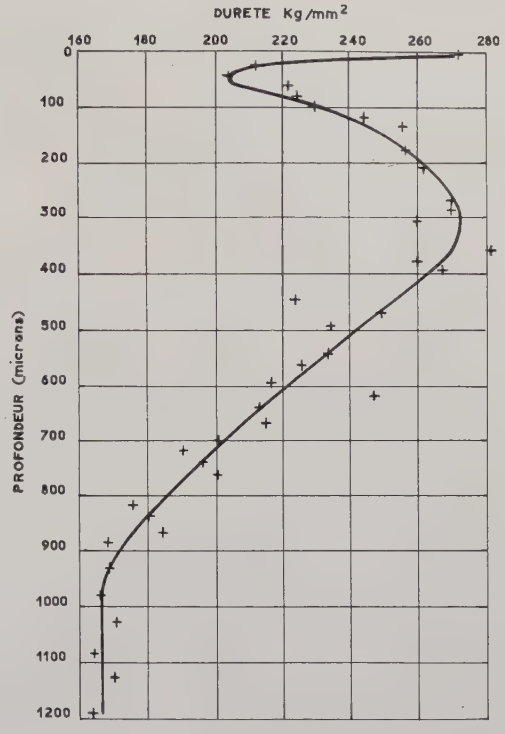


FIG. 2 *b*. — Relation entre dureté et profondeur pour deux disques dans le cas du roulement et glissement.

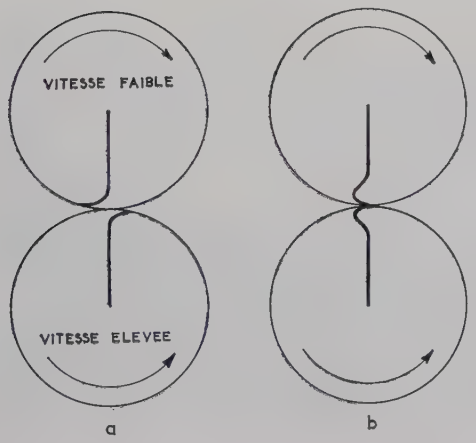


FIG. 3. — Déformations. *a*) Lorsque les forces de frottement sont prédominantes. *b*) Dans le cas du roulement.

On ne peut admettre que ces déformations proviennent des pressions dans le film d'huile, car WELSH a repris l'expérience de roulement à sec et il a fait les mêmes observations qu'en roulement lubrifié.

Bien que la forme générale des courbes de dureté puisse être expliquée en termes d'efforts imposés par une charge statique, il est clair que l'effet de durcissement ne se développe qu'après plusieurs milliers de cycles. D'autre part, il n'a pas été tenu compte du fluage macroscopique du matériau : celui-ci peut, en une certaine façon, augmenter le durcissement normal. Aussi peut-il être simplement établi que la profondeur du plus grand déplacement tangentiel ne coïncide pas avec la profondeur des tensions les plus élevées.

3. Travaux de Pomey.

POMEY (9) a étudié l'usure, au cours du roulement avec glissement de deux disques l'un sur l'autre, en frottement lubrifié, en utilisant la machine AMSLER. Ses essais comprenaient comme variables la dureté superficielle de l'une des éprouvettes et son état microgéométrique, le traitement chimique de surface de l'autre et la composition du lubrifiant. L'usure d'un galet d'acier doux contre un galet d'acier dur est fonction de l'état microgéométrique de surface de l'acier dur. Si le galet en acier dur est simplement rectifié, l'usure des galets en acier doux est très élevée. Si le galet en acier dur est rectifié et poli, cette usure devient très faible.

Les procédés les plus énergiques contre le grippage : huile chlorée soufrée, traitements superficiels de sulfuration ou de phosphatation s'accompagnent presque toujours d'une usure élevée.

C. OBJET DE CE TRAVAIL

L'étude exposée ici s'est attachée à examiner particulièrement les relations qui peuvent exister entre la nature du mouvement, le type de lubrification et les propriétés du métal.

On s'est efforcé de limiter le plus possible un sujet qui demeure trop vaste, même dans le cadre du titre qu'on lui a assigné.

On a d'abord fixé le choix du métal, en se limitant à des alliages ferreux, particulièrement aux structures ferritiques perlitiques (bien que l'on sache que de telles structures se prêtent souvent mal au frottement, on verra ci-dessous ce qui nous a amené à les choisir).

On s'est aussi fixé le lubrifiant. Pour ne pas s'éloigner (autant que faire se peut) des conditions pratiques de fonctionnement de mécanismes en service, on a choisi dans les expériences de frottement lubrifié une seule huile minérale pure classique. Ses caractéristiques seront données par la suite.

Enfin, les pièces ont été généralement prétraitées par un procédé de cémentation particulier faisant intervenir la diffusion du carbone, de l'azote et le soufre (ce procédé, pratiqué techniquement, est connu sous le nom de « sulfinusation »). Ce procédé nous donne un exemple assez complexe mais ayant une signification pratique.

L'appareil avec lequel on a réalisé les essais de frottement eux-mêmes est une machine qui permet à un coussinet et à un disque, ou à deux disques, de se déplacer relativement. Une charge, exercée par l'intermédiaire de ressorts étalonnés, permet d'appliquer le coussinet ou le disque supérieur sur le disque inférieur.

On a fait varier la charge appliquée, le type de mouvement, la forme, la nature et le traitement superficiel des éprouvettes, leur état de surface, considéré du point de vue microgéométrique.

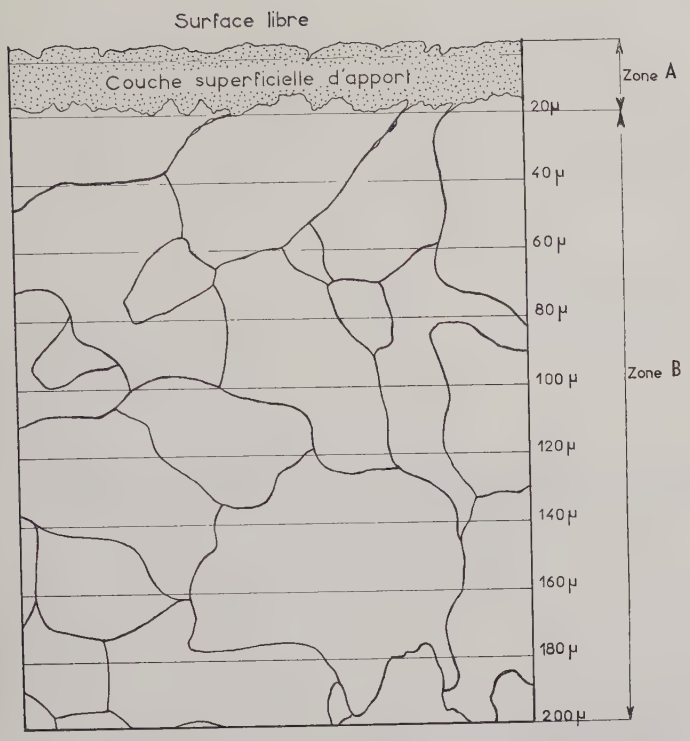


FIG. 4.

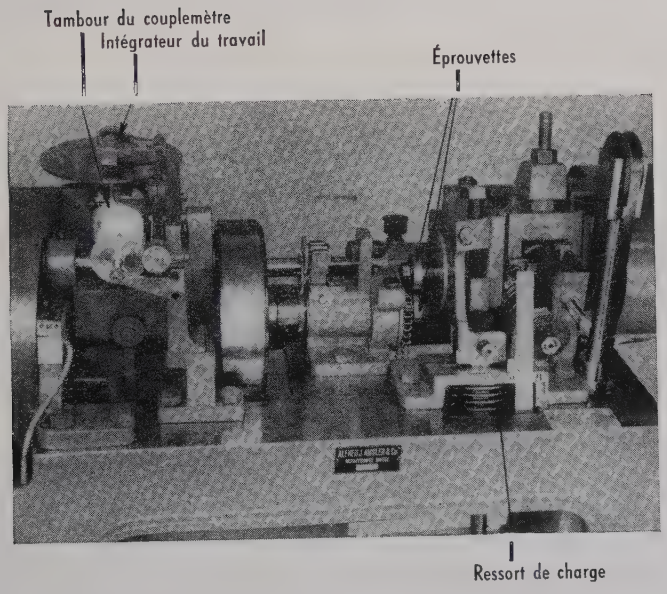


FIG. 5. — Machine AMSLER, vue d'ensemble.

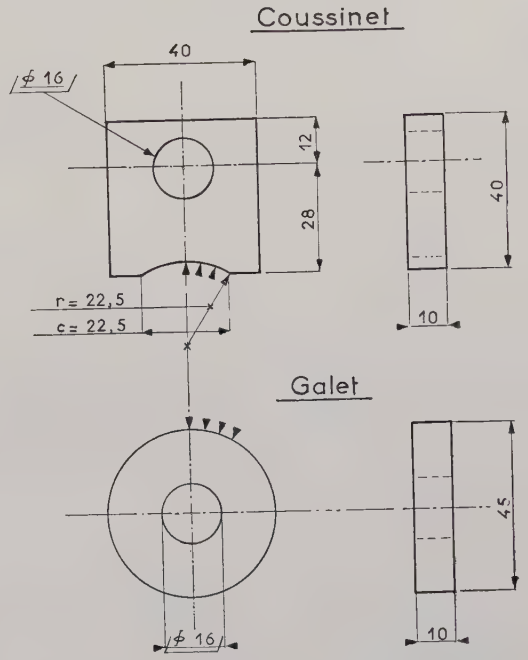


FIG. 6. — Machine AMSLER.
Dimensions des éprouvettes (mm).

On a pu mesurer ou enregistrer un certain nombre de paramètres : le moment de la force de frottement par rapport à l'axe de la machine (ce qui permet de calculer le coefficient de frottement), le travail de cette force, la température du lubrifiant (quand on en a utilisé) et dans certains cas, grâce à un thermocouple, la température en un point d'une éprouvette.

On a, avant les expériences et après les arrêts, déterminé l'état de surface des éprouvettes considéré du point de vue microgéométrique, et mesuré leur poids pour connaître leur usure.

Enfin, les expériences ont été accompagnées ou suivies d'examens macrographiques, micrographiques et microscléromètriques.

On sera amené à étudier, d'une part, la structure d'une zone superficielle d'une épaisseur de quelques microns (fig. 4, zone A), d'autre part, celle des couches sous-jacentes à cette zone, sur une profondeur de l'ordre du dixième de millimètre (fig. 4, zone B).

II. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES. PRÉCISION DES MESURES

A. APPAREIL DE FROTTEMENT

L'appareil avec lequel on a effectué les essais, réalisé par les *Établissements Amsler*, permet d'entraîner deux disques, ou un disque par rapport à un coussinet, en les faisant frotter l'un sur l'autre. La figure 5 en donne une vue générale.

Les éprouvettes sont montées en porte-à-faux sur deux axes parallèles. Un moteur électrique peut entraîner la rotation de l'axe inférieur, ou des deux axes, suivant les conditions de l'expérience.

Pièces de frottement : dimensions et mouvement.

On a toujours utilisé des pièces de frottement de mêmes dimensions. Les disques ont un diamètre de 45 mm et une épaisseur de 10 mm (fig. 6).

L'arbre sur lequel l'éprouvette inférieure est montée peut tourner avec une vitesse de 200 ou 400 tr/mn.

Suivant que l'éprouvette supérieure doit être entraînée ou non par l'éprouvette inférieure, on peut rendre son axe fou (roulement), supprimer sa rotation (glissement) ou encore la fixer soit avec une vitesse différente de celle du premier axe (inférieure de 10 %) et de sens opposé (roulement et glissement), soit avec une vitesse égale et de même sens (glissement) (fig. 7 *a*, *b*, *c*, *d*).

Mais, dans tous les cas, la vitesse du galet supérieur a une composante parallèle à son axe v_x, introduite par un mouvement de translation alternatif de cet axe (fig. 8). L'amplitude de ce mouvement est de 0,4 cm.

La période T peut avoir pour valeurs :

$$T_1 = 1{,}8 \text{ s} \quad \text{ou} \quad T_2 = 0{,}13 \text{ s}$$

ceci pour une vitesse de rotation du galet inférieur de 400 tr/mn (T est proportionnel à la vitesse de rotation de l'arbre inférieur).

Ceci donne pour vitesses maximales :

v_x (1) = 1,4 cm/s (mouvement alternatif lent) ;

v_x (2) = 19,3 cm/s (mouvement alternatif rapide).

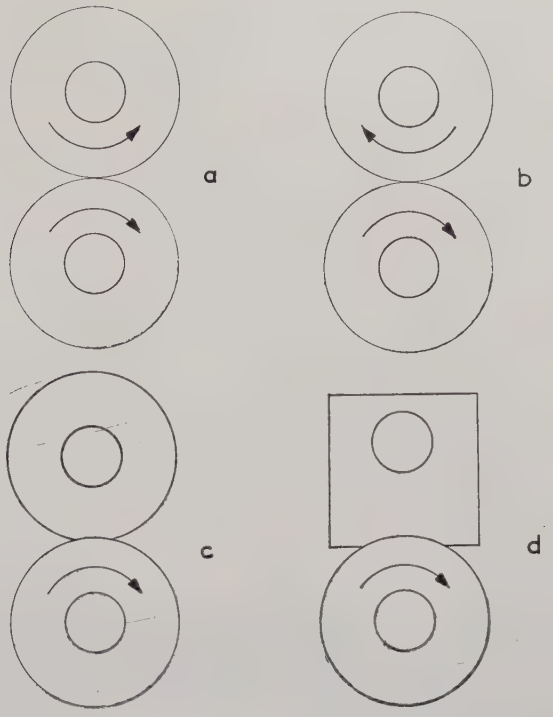


FIG. 7.

a. Roulement avec ou sans glissement relatif.
b. Glissement pur (rotation des deux disques dans le même sens).
c, d. Glissement pur (éprouvette supérieure fixe).

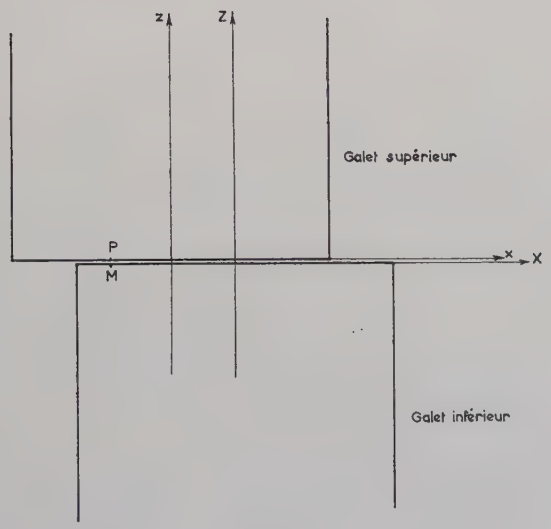


FIG. 8.

X : abscisse du point M lié au galet inférieur.
x : abscisse du point P lié au galet supérieur.
T : période du mouvement de translation alternatif.
V_T : vitesse du point P.

Charge appliquée.

La charge, appliquée par l'intermédiaire de ressorts étalonnés, a varié entre 5 et 200 kg. De la connaissance de la charge, des rayons de courbure des éprouvettes, du module d'élasticité et du coefficient de Poisson des matériaux, on peut déduire, par les relations données au chapitre I et déduites de la théorie de HERTZ, la pression moyenne élastique, la grandeur et la profondeur de la contrainte maximale de cisaillement.

Si l'on prend $E = 20\,000$ kg/mm², que la charge appliquée soit $F = 200$ kg, le rayon des galets $R = \frac{45}{2}$ mm et la longueur de contact $l = 6$ mm, on trouve :

Pression moyenne élastique $\frac{F}{2lb} = 77$ kg/mm² ;

Profondeur de la contrainte maximale de cisaillement : $z_1 = 0{,}17$ mm ;

Contrainte maximale de cisaillement : 30 kg/mm².

Or on admet que la contrainte admissible à la rupture au cisaillement est égale à la moitié de la contrainte admissible à la rupture en traction. Celle-ci pour un acier doux est égale à 38 kg/mm². On doit donc, dans le cas présent, être au-dessus des valeurs élastiques.

Coefficient de frottement.

Grâce à un dynamomètre pendulaire, on a enregistré le moment de la force de frottement par rapport à l'axe de l'éprouvette inférieure.

Le coefficient f qui sera déduit de l'enregistrement du moment de la force de frottement sera donc, non pas celui de la relation $R_T = \operatorname{tg}\varphi R_N$ (R_N = composante normale de la réaction égale et opposée à la charge appliquée, R_T = composante tangentielle de la réaction parallèle à la vitesse), mais en réalité celui défini par $R_{Ty} = f R_N$, la composante R_{Tx} étant introduite par le mouvement de translation alternatif du galet supérieur.

Cependant, tout au moins dans le cas du mouvement alternatif lent, qui est celui que l'on a utilisé, la composante v_x de la vitesse de glissement est toujours petite par rapport à sa composante v_y.

Ainsi, pour la vitesse de rotation de l'arbre inférieur égale à 400 tr/mn, on a vu que :

$$v_x \text{ max.} = 1{,}4 \text{ cm/s}$$

tandis que l'on a pour v_y :

— roulement et glissement : $v_y = 9{,}45$ cm/s ;

— glissement pur : $v_y = 189$ cm/s.

Ainsi ne commettra-t-on qu'une faible erreur sur $\operatorname{tg}\varphi$ en adoptant comme valeur celle de f.

Cas où la rotation du galet supérieur est libre : il y a roulement dans le plan normal à l'axe ox. Le moment que l'on mesure dans ces conditions est celui du couple qui s'oppose au roulement, mais auquel s'ajoute toujours le moment dû aux forces de liaison, qui tendent à ralentir le mouvement du galet supérieur, par exemple celles dues au frottement dans les bagues qui supportent l'axe de ce galet.

Le coefficient de frottement f considéré ici est celui que donnerait une force tangentielle fictive appliquée à la surface du galet et telle que son moment par rapport à l'axe du galet soit le même que celui du couple résistant dû au roulement et des couples parasites de paliers.

Travail dû au frottement.

A chaque instant un mécanisme intégrateur fait le produit du moment de la force de frottement enregistré par une quantité proportionnelle au déplacement de l'éprouvette inférieure. On en déduit le travail dû au frottement et correspondant au coefficient de frottement calculé.

Usure.

Les éprouvettes sont pesées à intervalles réguliers et leur perte de poids permet de chiffrer leur usure.

Lubrification des éprouvettes.

Lors des essais avec lubrifiant, le mode de lubrification a consisté en l'entraînement de l'huile par une chaîne portant sur l'axe du disque inférieur et plongeant dans un godet contenant le lubrifiant. L'huile entraînée par la chaîne est projetée entre les deux éprouvettes.

Sa composition, 50 % de *Bright Stock* et 50 % de *400 Solvent*, et sa viscosité situent brièvement l'huile utilisée.

TEMPÉRATURE	°C	37,8	50	98,9
	°F	100	122	210
Viscosité (cSk).....		211	108	17

— Indice de viscosité : VI = 92,8.
— Acidité : traces.

Mesure des températures.

On a contrôlé la température du lubrifiant dans son récipient avec un thermomètre à mercure.

Dans certains essais, un thermocouple a permis d'estimer la température de l'une des éprouvettes. Un montage particulier a été réalisé (fig. 9) pour permettre les mesures, exigeant pour chaque galet une préparation particulière. La soudure du thermocouple était placée à 2 mm de la surface de frottement.

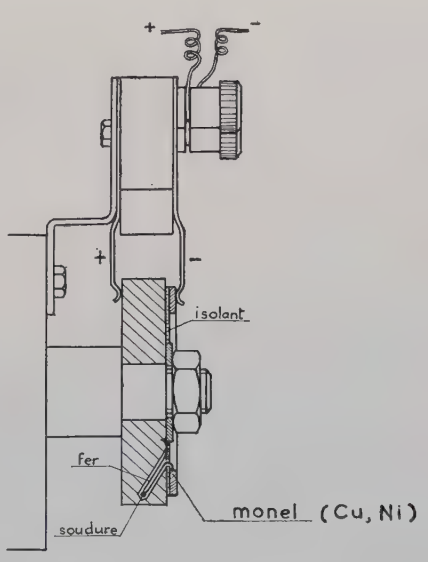


FIG. 9.

B. ÉTAT MICROGÉOMÉTRIQUE DE SURFACE

L'état de surface des éprouvettes considéré du point de vue microgéométrique est déterminé au moyen d'un profilomètre TALYSURF.

Un palpeur, constitué par une pointe de diamant, est déplacé mécaniquement sur la surface étudiée. Les déplacements relatifs du palpeur par rapport à une ligne de référence idéale sont transformés en

variations d'intensité de courant au moyen d'un système électromagnétique ; celles-ci, amplifiées, sont dirigées vers un système d'enregistrement graphique reproduisant le profil exploré.

Cet appareil fournit comme critère R_a, hauteur moyenne des irrégularités de niveau. Ce nombre est défini de la façon suivante :

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |g(x)|\, dx$$

L = longueur d'intégration ;

$g(x)$ = équation du profil rapportée à sa ligne moyenne (droite qui, par intersection avec le profil, définit au-dessus et au-dessous des aires de sommes égales).

La figure 10 donne un exemple d'enregistrement de profils.

Le rugomètre interférentiel de MIRAU a permis également d'apprécier le degré de poli des surfaces (fig. 11).

C. PRÉCISION DES MESURES

La charge appliquée est connue avec une erreur de 0,5 kg lorsqu'elle est inférieure ou égale à 20 kg et de 2,5 kg lorsqu'elle est comprise entre 20 et 200 kg.

L'erreur relative sur le moment de la force de frottement enregistré est de 2,5/100

Par conséquent, l'erreur relative sur le coefficient de frottement calculé f sera :

— pour une charge de 20 kg : $\frac{\Delta f}{f} = \frac{5}{100}$;

— pour une charge de 50 kg : $\frac{\Delta f}{f} = \frac{7{,}5}{100}$;

— pour une charge de 200 kg : $\frac{\Delta f}{f} = \frac{3{,}75}{100}$.

Les éprouvettes sont pesées avec une erreur absolue de 0,5 mg.

Pour déterminer R_a, hauteur moyenne des irrégularités de niveau, on prend la moyenne de quatre à six déterminations. La précision sur R_a est de l'ordre de 20/100.

La température que donne le thermocouple monté sur l'une des éprouvettes est connue à trois degrés près. Le montage que l'on a réalisé a permis d'effectuer des mesures jusqu'à 300° C. Au-delà, la fusion d'une colle que l'on a dû utiliser a empêché de poursuivre les mesures.

D. MICRODURETÉ

La microdureté (11), (12) sera utilisée principalement comme moyen d'étude de l'écrouissage.

Rappelons que la microdureté, comme la macrodureté Vickers, peut être définie par l'expression :

$$H = \frac{1{,}854\, P}{d^2} \text{ (kg/mm}^2\text{)}$$

où H est la dureté, P la charge en kilogrammes et d le diamètre de l'empreinte en millimètres.

Ce qui distingue la dureté Vickers de la microdureté, c'est que la microdureté n'obéit pas à la loi de KICK :

$$P = cd^2 ; c = \text{constante}$$

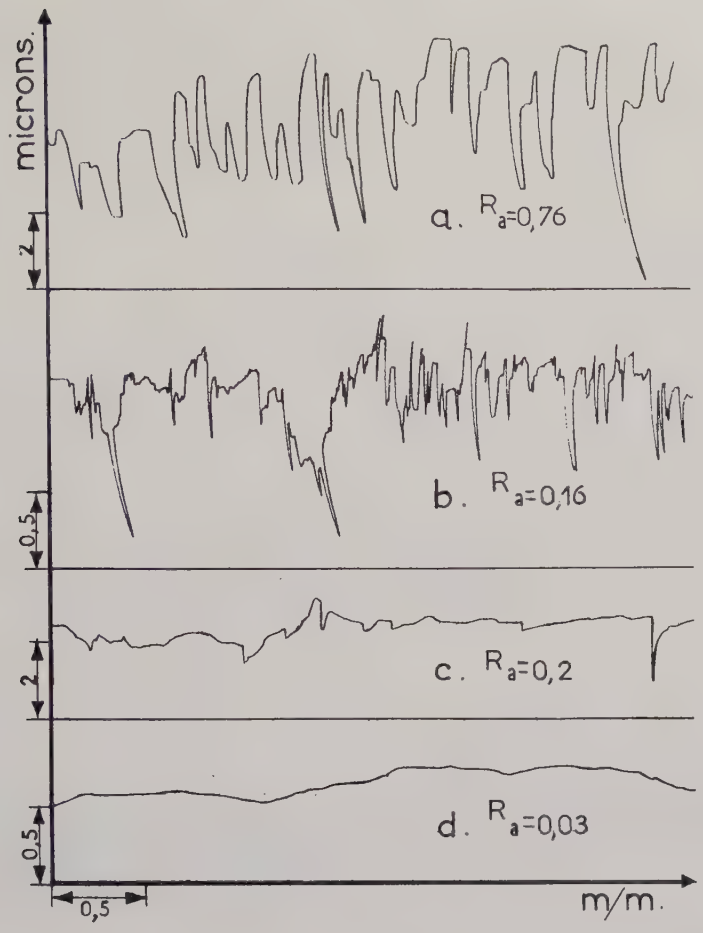


FIG. 10. — Enregistrement du profil microgéométrique des surfaces de frottement avant (*a et b*) et après essai (*c* et *d*) dans le cas du couple galet-galet.

R_a : hauteur moyenne (en microns) des irrégularités de niveau.

a et *c* : galet supérieur, *b* et *d* : galet inférieur.

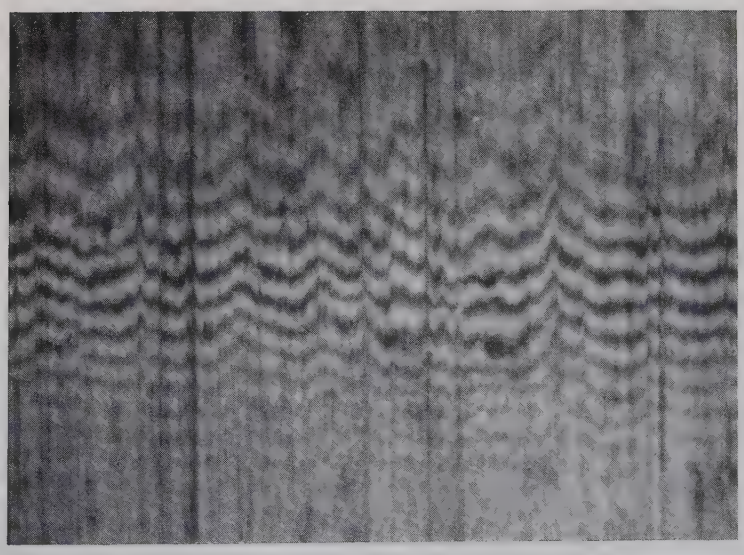


FIG. 11. — Rugomètre de MIRAU. Galets avant essai. Grossissement 500.

La macrodureté Vickers est constante. La microdureté est fonction de la charge.

On admet que l'on est dans les limites de la microdureté pour les charges inférieures à 200 g environ.

Primitivement, on a trouvé pour la microdureté la relation empirique :

$$P = cd^n \qquad n \neq 2$$

D'où l'on déduit :

$$\left.\begin{array}{l} \log P = a + n \log d \\ \log H = b + (n-2) \log d \end{array}\right\} \quad a \text{ et } b = \text{constantes}$$

Dans le diagramme log P/log d, les mesures devraient donc être représentées par une droite.

En fait, cette relation s'est révélée n'être qu'une approximation assez grossière. L'allure des courbes log P/log d peut, l'analyse le montre, toujours être représentée par la superposition de deux courbes typiques qui sont montrées dans la figure 12. Il importe de savoir que ces deux formes sont en relation avec la nature de l'échantillon :

La forme selon la figure 12 *a* est obtenue avec les métaux purs et non perturbés ;

La forme suivant la figure 12 *b* est caractéristique d'échantillons ayant, d'une façon générale, un réseau perturbé (écrouissage, tensions internes, hétérogénéité, etc.). Si l'on assimile ces courbes à une droite, la valeur de leur pente moyenne (pseudo-exposant n) est alors supérieure à 2.

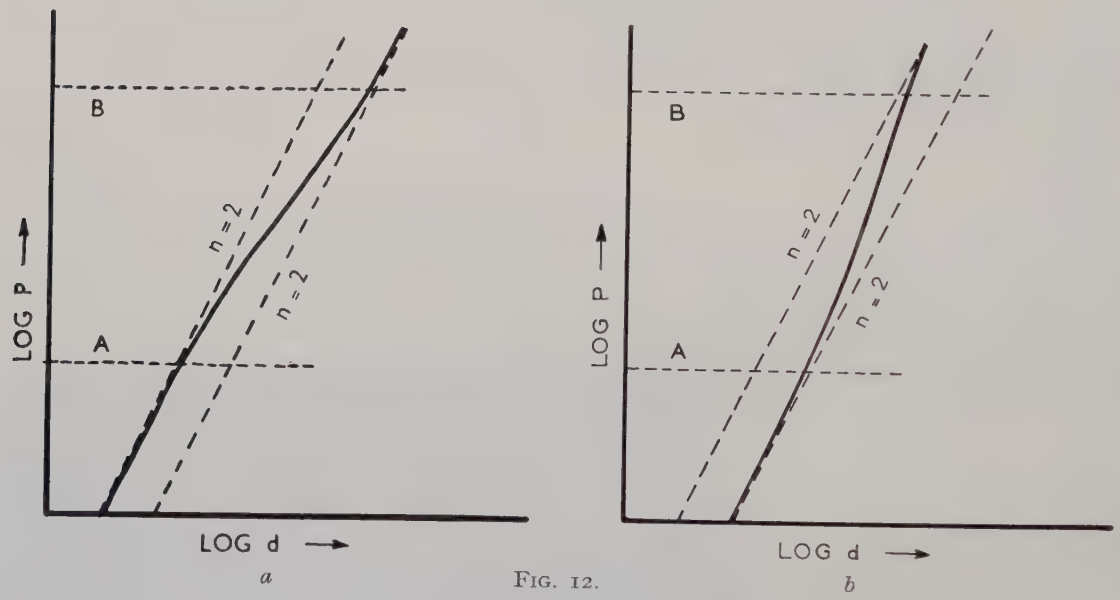


FIG. 12.

Certains auteurs admettent au contraire que n décroît quand le degré d'écrouissage croît, mais la contradiction n'est qu'apparente. En fait, ces dernières observations se rapportent généralement à l'essai BRINELL, et l'exposant n est alors celui de la loi dite de Meyer qui a la même forme mais non pas la même signification que la relation empirique pour la microdureté Vickers.

Il convient de souligner la grande sensibilité de la microdureté vis-à-vis de certains facteurs expérimentaux, en particulier le mode du polissage. Il importe donc de maintenir constantes autant que possible toutes les conditions de préparation et d'essai.

L'influence de l'écrouissage a été étudiée par plusieurs auteurs. Certains admettent que n décroît

généralement quand le degré d'écrouissage croît. D'autres ont trouvé le contraire. Les études de H. Buckle confirment cette dernière conception. Celui-ci admet d'une façon générale que la présence de tensions internes augmente la valeur de n.

III. MATÉRIAUX ET PRÉTRAITEMENT UTILISÉS. MORPHOLOGIE DES COUCHES PRÉTRAITÉES SANS MODIFICATION DUE AU FROTTEMENT

A. NATURE DES MATÉRIAUX UTILISÉS

En dehors du fer *ARMCO* et de l'acier doux, les matériaux utilisés (aciers plus chargés en carbone, aciers alliés, fontes) l'ont été d'abord pour des raisons d'ordre technique dans le but d'étudier l'aptitude de tel d'entre eux à bénéficier du traitement de surface utilisé.

En fait, nous limiterons les résultats donnés dans cet exposé, hors ceux concernant les structures ferritiques et ferritiques-perlitiques à teneur en carbone peu élevée (0,10 %), à ceux ayant trait à :

— deux types de fontes de chemises moteur, R et S, un type de fonte de segments, G, utilisés sur moteurs d'autorail par la *S. N. C. F.* ;

— un type d'acier préconisé par le laboratoire d'une aciérie française, comme étant particulièrement apte à subir le traitement de « sulfinusation ». Il s'agit d'un acier de symbole *AFNOR* : 30 CND 14.

Voici les résultats d'analyse de ces matériaux :

Fontes.

(%)	CHEMISE MOTEUR R	CHEMISE MOTEUR S
Carbone	2,81	3,04
Silicium	2,33	2,44
Manganèse	0,63	1,75
Phosphore	0,116	0,052
Soufre	0,038	0,010
Nickel	0,84	0,27
Chrome	0,37	0,37
Titane	0,04	0,09
Cuivre	0,13	0,35
Molybdène	traces	traces
Vanadium	0,02	0,01

Analyse moyenne de la fonte G.

Carbone	3 %
Silicium	2,4 à 2,8 %
Manganèse	0,75 à 1 %

Phosphore	0,20 à 0,80 %
Soufre	0,10 %
Chrome	0,20 %
Nickel, cuivre	0,34 %

Aciers.

ACIER DOUX XC 10		ACIER 30 CND 14	
	%		%
Carbone	0,115	Carbone	0,28
Soufre	0,025	Manganèse	0,41
Phosphore	0,02	Silicium	0,28
		Phosphore	0,014
		Soufre	0,016
		Chrome	3,77
		Molybdène	0,18
		Aluminium	—
		Nickel	0,96

L'acier 30 CND 14 a été trempé à l'air à 900° C et revenu à 600° C.

Sa dureté est alors de 330 unités Vickers sous 10 kg.

Les éprouvettes des fontes R et S ont été prélevées dans deux chemises de moteurs d'autorail, celles de la fonte G dans un tube où sont usinés les segments. Pour pouvoir utiliser sur la machine les éprouvettes ainsi prélevées, une monture spéciale a dû être réalisée.

Le croquis des éprouvettes et de leurs montures est donné sur les figures 13 et 14.

B. ÉTUDE MICROGRAPHIQUE DES COUCHES TRAITÉES SANS MODIFICATION DUE AU FROTTEMENT

1. Réalisation du traitement de surface [1].

Voici certaines précisions concernant le traitement généralement utilisé :

Il s'agit d'un traitement thermique réalisé dans un bain de sels fondus (23) dont la composition peut connaître certaines variantes. En France et en Allemagne, la composition d'équilibre est obtenue à partir de trois sels :

(1) NaCN 30 %, CO_3Na_2 30 %, KCL 40 %

(2) NaCN 60 %, KCL 40 %

(3) NaCN 24 %, KCL 30 %, SO_3Na_2 46 %

Un procédé analogue est utilisé en U. R. S. S. La composition que l'on connaît est la suivante (24) :

Partie neutre :	17 % NaCL	25 % $BaCL_2$	38 % $CaCL_2$
Partie active :	13,2 % FeS	3,4 % SO_4Na_2	3,4 % $Fe(CN)_6K_4$

[1] R. Courtel, H. Buckle et F. Sébilleau (13), (14) ont été des premiers à étudier les propriétés de ce procédé. Une étude morphologique plus approfondie en a été faite ensuite (15), (16), (17), (18). Les propriétés de dureté conférées par ce prétraitement aux aciers ont déjà été étudiées par H. Buckle (14), par N. Collari et P. Virdis (15). Les propriétés de frottement l'ont été par F. Morel (19), par A. Popoff (20), puis par nous (21) ; les propriétés de fatigue par R. Cazaud (22).

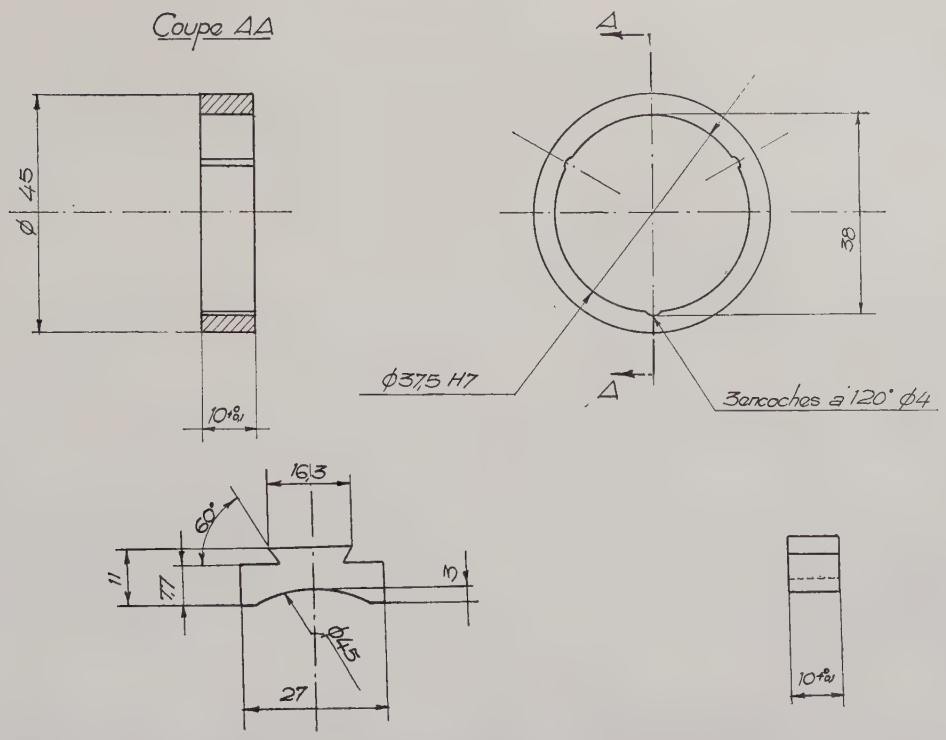


FIG. 13. — Éprouvettes d'usure.

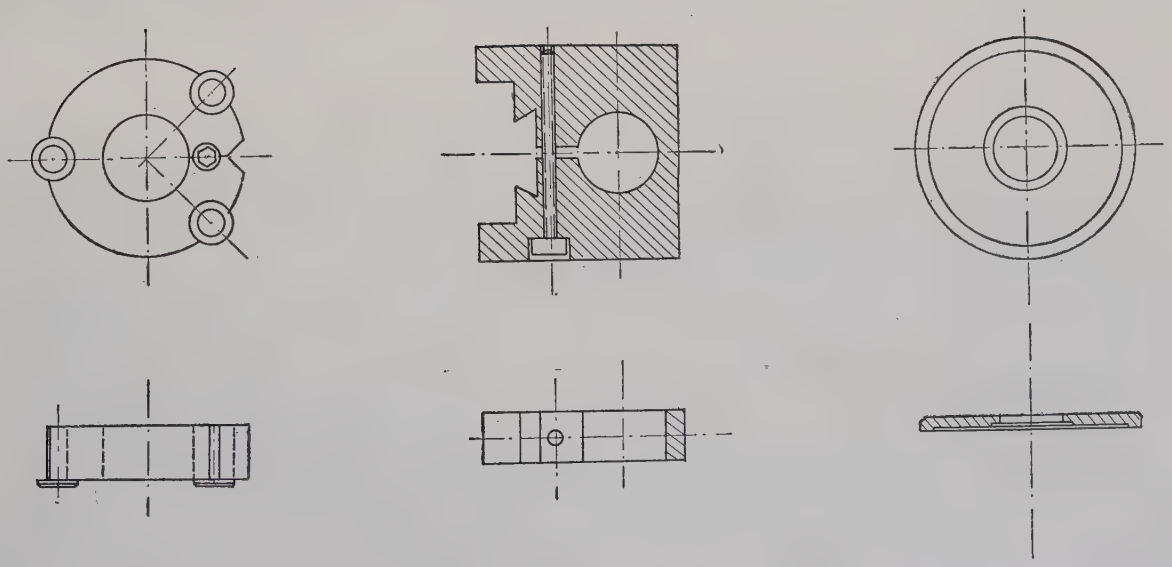


FIG. 14. — Support pour éprouvettes d'usure.

Cependant, certaines difficultés de réalisation peuvent provenir de la nécessité d'obtenir une composition du bain constante au cours du temps, en particulier malgré les phénomènes d'oxydation au contact de l'air libre, et cette composition ne saurait être définie que dans certaines limites.

Les conditions thermiques du traitement sont fixées essentiellement par la température du bain.

Il convient, pour que la diffusion soit assez rapide, de se placer à une température aussi élevée que possible mais cependant inférieure à celle du point eutectoïde du diagramme Fe — N (590° C) (25).

En pratique, on opère à la température de 570° C. La durée du traitement généralement adoptée est de deux heures et demie à trois heures.

Le traitement est appliqué essentiellement à des alliages ferreux : aciers ordinaires, certains aciers alliés, fontes.

2. Technique de préparation des surfaces métallographiques.

On a, dans la plupart des cas, examiné des structures « sulfinusées » en coupe perpendiculaire à la surface traitée. Il était donc impératif d'obtenir des polissages aussi plans que possible. De plus, la couche superficielle fragile apportée par le traitement a obligé à prendre des précautions spéciales pour ne pas la détériorer au cours du polissage. On a essayé plusieurs techniques de montage des échantillons avant polissage : enrobage en bakélite, en résine synthétique polymérisable à froid et montage en étau. Ce dernier mode permet d'obtenir des échantillons à bords très plans et a donné le plus de satisfaction.

On prend soin, avant de serrer les mors, de glisser entre l'échantillon et l'étau deux minces lames de liège, dans un double but :

Éviter l'écrouissage de l'échantillon au serrage ;

Ne pas laisser d'intervalles vides entre l'échantillon et l'étau, et obtenir par là une protection du bord à polir.

On polira donc simultanément les deux mors de l'étau et l'échantillon. Les mors sont en acier d'une dureté, autant que possible, voisine de celle de l'échantillon.

3. Examen de la couche superficielle d'apport.

Lorsque l'on soumet au traitement un alliage ferreux (acier ou fonte) on constate toujours l'apport en surface d'une couche superficielle. L'effort mécanique de polissage, perpendiculaire au plan de la couche, peut parfois l'arracher partiellement par endroits.

Dans la plupart des cas, cette couche est visible, après polissage mécanique sans attaque, sur une coupe perpendiculaire à la surface plane de l'échantillon. Elle se manifeste alors par une bande plus sombre au bord de la préparation.

Dans le cas du fer et des aciers non alliés recuits après attaque à l'acide nitrique étendu à 2 % dans l'alcool éthylique (Nital 2 %), cette couche, d'une épaisseur de dix à vingt microns, prend un aspect hétérogène et poreux qui montre qu'elle n'est pas constituée d'une phase unique (fig. 15).

Sur le fer et l'acier doux recuit, elle se prolonge, sous forme de filets, le long des joints de grains (on sait que la diffusion peut se faire préférentiellement le long des joints de grains). D'autre part, entre la couche superficielle elle-même et la matrice, on observe fréquemment un espace noir. Ceci n'est que la traduction optique de la différence de relief qu'entraîne leur inégal comportement au polissage et à l'attaque. (La couche superficielle est toujours plus dure que la matrice sous-jacente.)

Cet espace noir n'existe plus pour des aciers plus chargés en carbone, tels que l'XC 35 ou l'XC 48 sulfinusés (1).

On retrouve cette couche superficielle, avec une épaisseur sensiblement égale et le même aspect, sur tous les autres aciers non alliés sulfinusés recuits. On l'observe également sur les fontes, avec une tendance à se prolonger entre la perlite et les lames de graphite affleurant le bord pour les fontes à graphite lamellaire.

Sur les structures trempées et revenues avant sulfinusation, on observe toujours la même couche superficielle avec un aspect et une épaisseur comparables à ceux obtenus sur le même acier sulfinusé à l'état recuit, et ceci quelle que soit la composition chimique de l'acier.

Signalons enfin que les attaques électrolytiques des échantillons sulfinusés provoquent toujours une dissolution plus accentuée de la couche superficielle que de la matrice, ce qui rend la première invisible. En revanche, ce mode d'attaque facilitera parfois la résolution de structures sous-jacentes complexes.

Des examens à la sonde de Castaing (26) ont confirmé, dans le cas d'un acier XC 10, la nature hétérogène de la couche. Dans les points d'impact de la sonde où la teneur en soufre était supérieure à 1 %, les examens ont donné des teneurs en soufre de 10 à 20 %.

Les mesures de microdureté, faites dans la couche superficielle, également dans le cas d'un acier doux ont donné des valeurs comprises entre 650 et 700 kg/mm².

4. Étude de la zone de diffusion.

La couche superficielle d'apport est suivie d'une zone de diffusion dont la micrographie révèle l'existence soit par la présence visible de précipités (à condition que le refroidissement soit suffisamment lent) dont la nature doit être attribuée à des nitrures, soit par une coloration. On peut également caractériser dans cette zone la présence de cémentite.

1. Structures recuites. Ferrite. Examen d'un acier de symbole AFNOR XC 10 sulfinusé.

Cet acier avait subi une immersion pendant trois heures à 570° C dans un bain de « sulfinusation » suivie d'un refroidissement à l'air calme jusqu'à la température ambiante.

Dans ces conditions, à la couche superficielle déjà décrite succède une zone caractérisée par la présence de précipités visibles sous forme « d'aiguilles » qui ne sont, en réalité, que les sections par le plan de polissage de disques ou de plaquettes. Certaines de ces aiguilles sont groupées parallèlement les unes aux autres ou forment entre elles des angles qui paraissent bien définis (fig. 16).

Quel que soit le réactif d'attaque utilisé, ces aiguilles sont bien visibles dans la ferrite. Nous verrons ci-dessous comment on peut également les révéler dans la perlite.

La largeur apparente de ces aiguilles est fonction de la durée et du type de l'attaque. On peut l'observer sur le même échantillon, attaqué d'abord au nital, puis, après que soit effacée cette première attaque, par une solution d'acide chromique à 10 % dans l'eau, cette seconde attaque étant opérée électrolytiquement.

Sur cet échantillon, la profondeur de la zone d'aiguilles (mesurée depuis le bord de l'échantillon jusqu'à la disparition des dernières aiguilles) est de 4,2/10 mm.

---

(1) XC 35 est un symbole *AFNOR* qui indique qu'il s'agit d'un acier non allié de teneur en carbone de l'ordre de 0,35 %. XC 48..... 0,48 %.

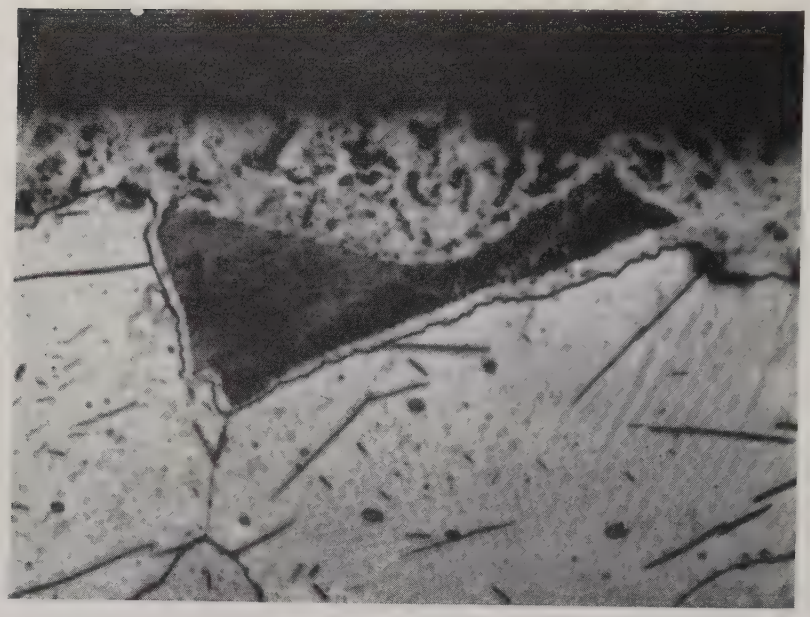


FIG. 15. — G. 1 100.

FIG. 16. — G. 450.

Une autre zone est formée de fins précipités dans la ferrite, rassemblés parfois en agglomérats. Ces fins précipités existent à la même distance du bord que les aiguilles (qui en font « le vide » autour d'elles) et de plus pénètrent plus avant à l'intérieur de l'échantillon. On doit attribuer ces deux types de précipitations à deux formes du même nitrure Fe_4N (25). On connaît d'ailleurs les plans dans lesquels les nitrures Fe_4N précipitent dans la ferrite (27) : ce sont les plans $\{112\}$.

2. Structures recuites. Perlite.

a. Acier XC 35 recuit.

Composition de l'acier examiné :

$$C = 0{,}37\ \%\qquad S = 0{,}02\ \%\qquad P = 0{,}02\ \%$$

Pour l'XC 35, on retrouve les résultats relatifs à l'XC 10. L'attaque au nital révèle bien la couche superficielle et les aiguilles dans la ferrite. En revanche, après une attaque au nital, les aiguilles ne sont pas visibles dans la perlite qui est trop colorée. Une attaque anodique à l'acide chromique à 10 % dans l'eau (densité de courant 1 A/cm²) a permis de révéler ces précipités dans la perlite (fig. 17). Dans cette zone, où l'orientation des lamelles de perlite est variable, les aiguilles sont orientées suivant deux directions bien définies faisant entre elles un angle de 45°. Certaines aiguilles dans la ferrite ne franchissent pas la perlite ; d'autres, plus rares, longent sa périphérie ou y pénètrent. La couche superficielle, après cette attaque, a subi une dénivellation qui la fait disparaître complètement.

La profondeur de la zone à aiguilles (mesurée depuis le bord de l'échantillon jusqu'à la disparition des dernières aiguilles) n'est plus que de 180 μ.

b. Acier XC 95 recuit.

On s'est proposé d'examiner comment pouvaient exister dans la perlite de tels précipités en plaquettes malgré la présence antérieure de lamelles de cémentite et indépendamment de l'orientation de ces lamelles.

On a observé, en comparant la profondeur de diffusion des précipités dans l'XC 10, l'XC 35 et l'XC 48, que cette profondeur diminuait quand augmentait la teneur en carbone de l'échantillon. (Elle passait de 420 μ pour l'XC 10 à 180 μ pour l'XC 35 et à 150 μ pour l'XC 48).

On a recherché s'il était possible de révéler encore des aiguilles dans un échantillon à structure perlitique sans ferrite. On a examiné à cet effet un échantillon d'acier hypereutectoïde (XC 95).

Perlite granulaire :

On a traité un échantillon d'XC 95 présentant une structure perlitique granulaire et non lamellaire, une telle structure étant obtenue par coalescence de la cémentite perlitique au cours d'un chauffage dans le domaine ferrite-cémentite, à température aussi élevée que possible, c'est-à-dire vers et au-dessous de 700° C.

Cette cémentite de coalescence se présente en plages irrégulières sous forme de petits grains arrondis et est entourée de ferrite.

Elle est caractérisée par l'attaque au picrate de soude à l'ébullition qui la noircit.

Le traitement, outre l'apport de la couche superficielle, produit encore ici la formation de précipités : mais on observe ces précipités dans la ferrite seulement.

Perlite lamellaire :

Après un recuit à 950° C et refroidissement lent, nous avons obtenu une structure à perlite lamel-

FIG. 17. — G. 900.

FIG. 18. — G. 16 000 (J. PLATEAU, G. HENRY).

laire. On observe alors qu'après sulfinusation, ni le nital, ni l'attaque à l'acide chromique n'ont fait apparaître de structure à précipités.

Conclusion.

En ce qui concerne la présence de précipités dans la perlite, trois observations sont à rapprocher.

En présence de perlite lamellaire :

Le nombre des précipités décroît quand la teneur en perlite de l'échantillon croît, et il devient nul lorsqu'on atteint la concentration de l'eutectoïde où la ferrite disparaît.

Les précipités contenus dans la perlite paraissent ne jamais l'être entièrement.

En présence de perlite granulaire :

On n'observe des précipités que dans la ferrite seulement.

Ceci permet donc de penser que lamelles de cémentite et lamelles de nitrures constituant les « aiguilles » s'interpénètrent seulement mais ne sauraient se sectionner.

Un examen par réplique en microscopie électronique a d'ailleurs permis récemment de confirmer cette interprétation (fig. 18).

On peut d'ailleurs rapprocher ce type d'interpénétration d'une structure analogue, observée par Hull et Garwood (28), dans un laiton métastable et dont l'étude suggère une croissance par dislocation.

3. Fontes grises sulfinusées R et S.

Dans ces deux fontes grises, où sont bien caractérisées les lames de graphite, la perlite lamellaire et l'eutectique phosphoreux, on constate que la « sulfinusation » apporte comme seul élément visible nouveau à la structure micrographique celui d'une couche mince superficielle de quelques microns d'épaisseur, blanche, hétérogène et fragile, qui a tendance à se prolonger entre la perlite et les lames de graphite affleurant le bord.

Cette couche paraît être de même nature que celle qui se retrouve sur les échantillons d'aciers sulfinusés.

La « sulfinusation » n'a pas fait apparaître de structures à précipités dans la perlite.

C. ÉTUDE MICROSCLÉROMÉTRIQUE DE L'INFLUENCE DES CONDITIONS DE REFROIDISSEMENT SUCCÉDANT A L'IMMERSION DES PIÈCES TRAITÉES

On sait que les conditions de refroidissement à la sortie du bain, comme celles d'un revenu succédant éventuellement au traitement, ont une influence sur la densité et la forme de la précipitation produite dans la zone de diffusion sur des échantillons « sulfinusés ».

On a voulu ici relier à des mesures microsclérométriques l'absence ou la présence, visible micrographiquement, de cette précipitation.

1) On a donc traité simultanément pendant trois heures à 570° C, dans un bain industriel de « sulfinusation », deux échantillons d'acier doux de forme parallélépipédique (section carrée de 6 mm de côté) usinés dans le même barreau, qui ont été trempés à l'eau à la sortie du bain.

Le premier de ces échantillons, A, a été poli et attaqué sans subir d'autre traitement. Sur le second, B, un revenu d'une demi-heure en atmosphère neutre a été effectué à 300° C avant polissage.

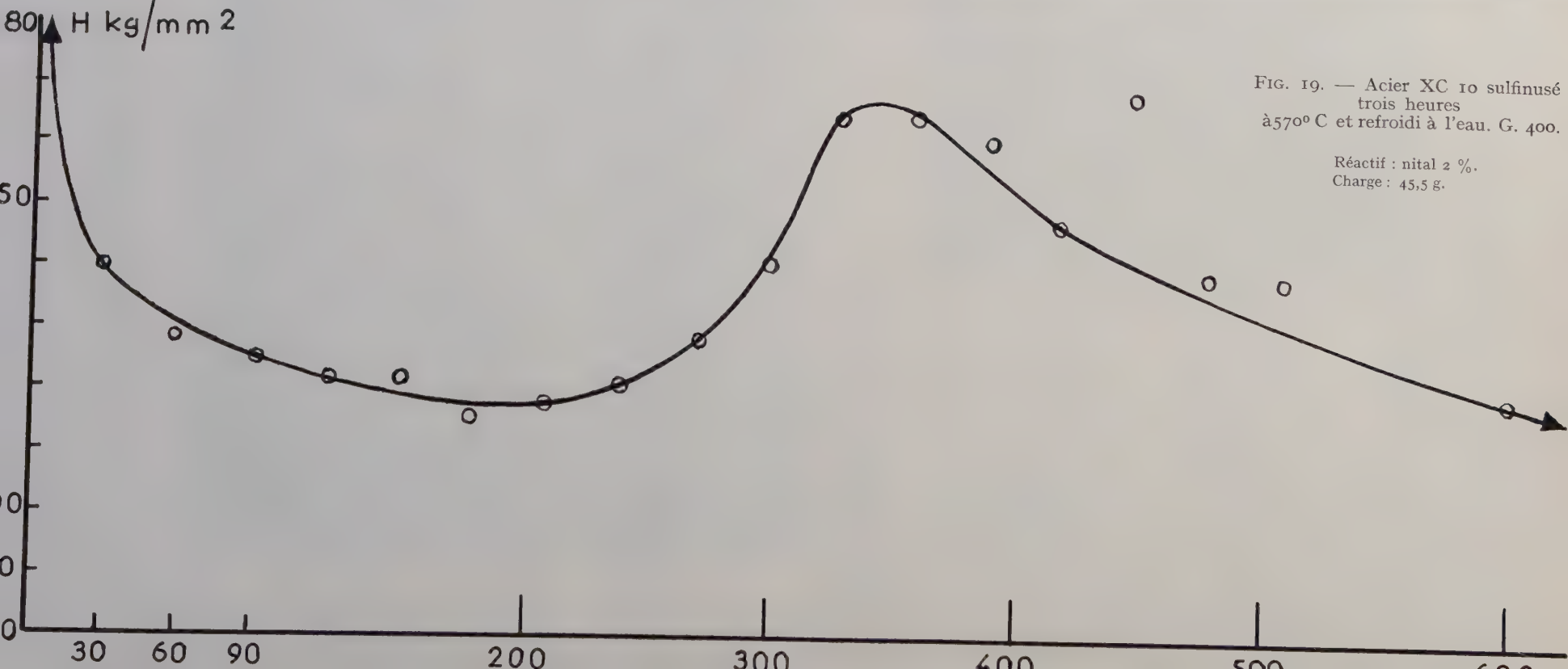
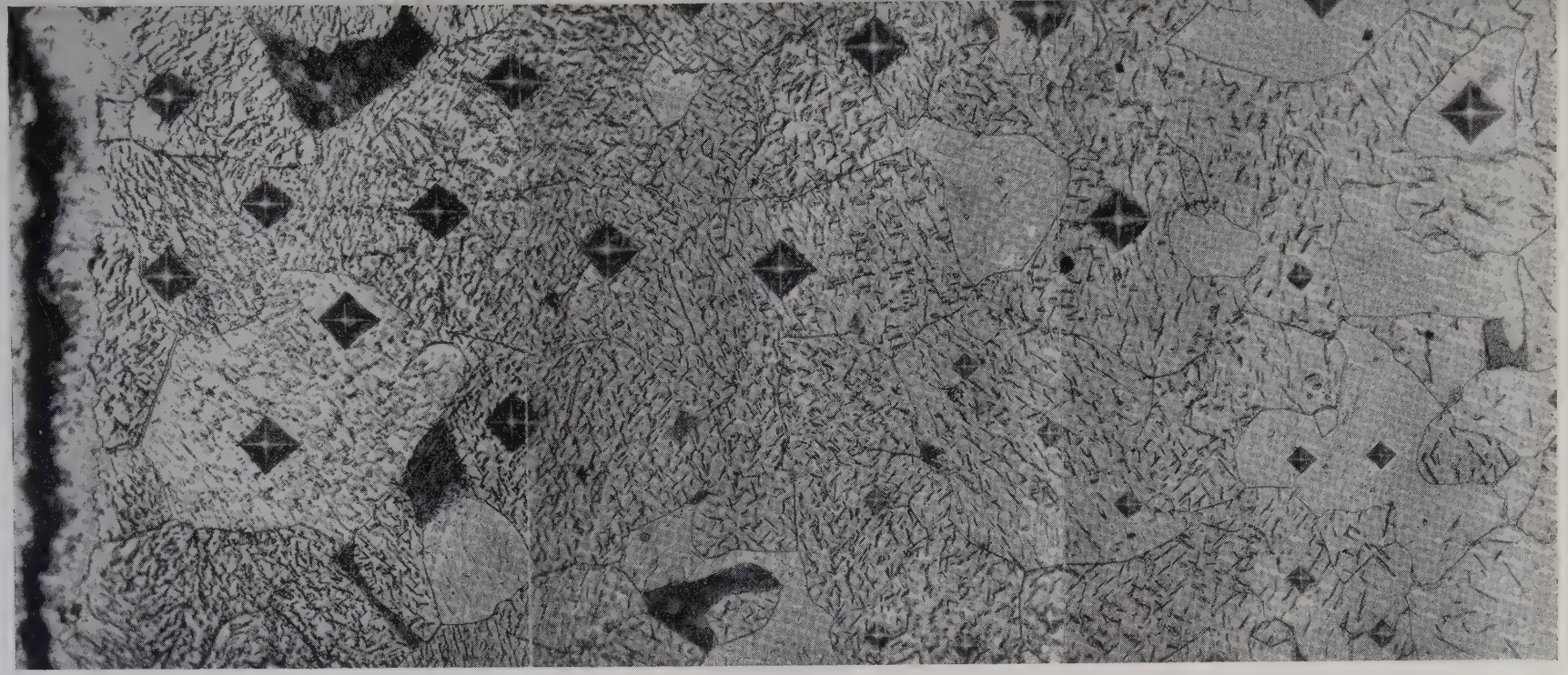


FIG. 19. — Acier XC 10 sulfinusé trois heures à 570° C et refroidi à l'eau. G. 400.

Réactif : nital 2 %.
Charge : 45,5 g.



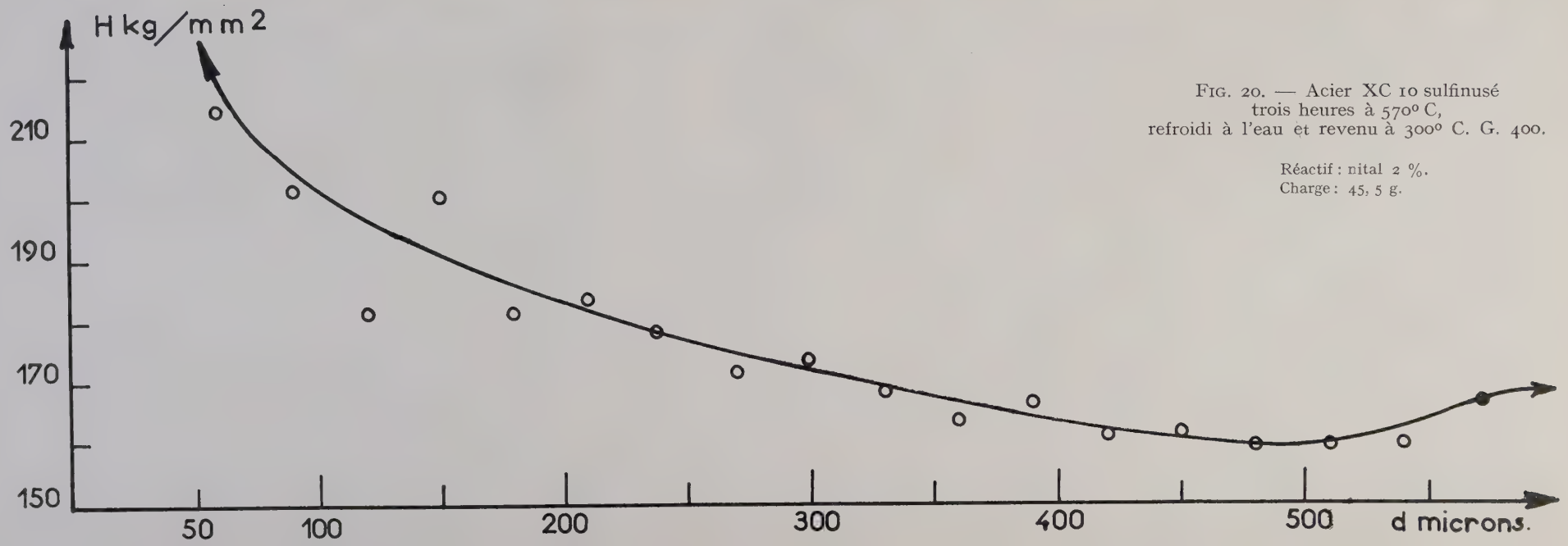


Fig. 20. — Acier XC 10 sulfinusé
trois heures à 570° C,
refroidi à l'eau et revenu à 300° C. G. 400.

Réactif : nital 2 %.
Charge : 45, 5 g.

On observe que sur l'échantillon A aucune précipitation visible ne succède à la couche superficielle d'apport (de 15 à 20 μ d'épaisseur) et à ses ramifications.

Sur l'échantillon B, au contraire, se manifeste une précipitation abondante, dont la densité va en décroissant depuis la surface libre et qui disparaît à une profondeur que l'on peut estimer à 5/10 mm depuis le bord.

Les mesures de microdureté ont été effectuées principalement avec trois charges égales à 10,9 g, 20,5 g et 45,5 g.

Remarque.

L'échelle des abscisses des courbes a été choisie sur les figures 19 et 20 de telle façon qu'elle corresponde à celle de la zone photographiée au-dessus d'elles.

Les mesures effectuées jusqu'au cœur des échantillons sont données par les figures 21 et 22.

Quatre empreintes effectuées dans la microcouche elle-même ont permis d'estimer la dureté de cette couche superficielle à 700 kg/mm² (charge 10,9 g).

COUCHE SUPERFICIELLE (CHARGE 10,9 G)				
H (kg/mm²)	700	700	700	620

Les autres mesures ont eu lieu à partir de 30 μ de la surface libre, soit à une distance comprise entre 10 et 15 μ de la couche superficielle.

On a reporté graphiquement, à partir donc de 30 μ et jusqu'à ce qu'on atteigne la dureté à cœur, les résultats des mesures effectuées sur les deux échantillons A et B et sous chacune des charges utilisées.

Indiquons que chaque point représente la moyenne des mesures (quatre à huit) effectuées à la même distance du bord de l'échantillon.

Dureté à cœur.

Cette dureté est atteinte à partir d'une profondeur de l'ordre de 1 800 μ.

Les valeurs trouvées qui, comme on le sait, sont fonction de la charge P tant que celle-ci reste dans le domaine de la microdureté proprement dite, ont été :

TABLEAU I.

DURETÉ A CŒUR					
Charge (g)		6,1	11	20,5	45,5
Dureté H (kg/mm²)	A	167	160	157	155
	B		129		119

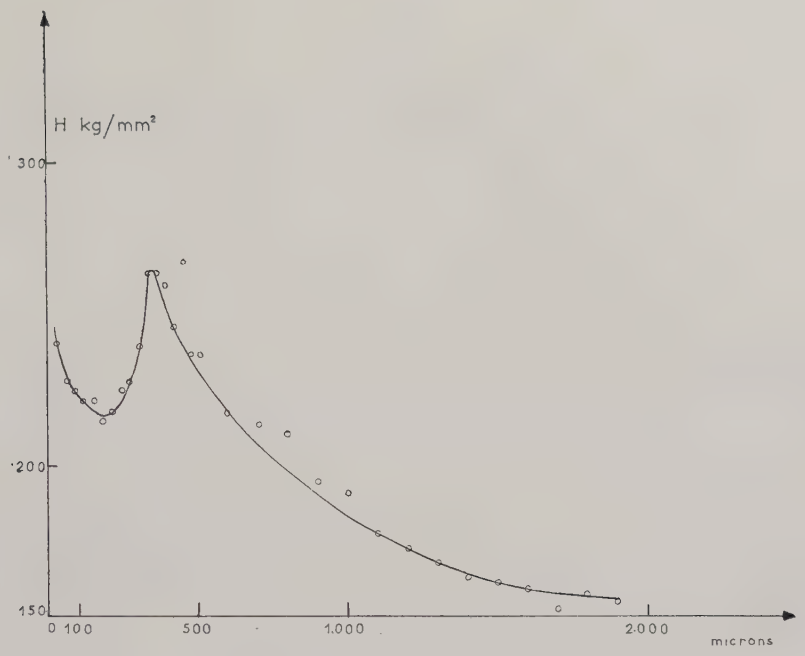


FIG. 21. — XC 10 sulfinusé trois heures à 570° C et trempé dans l'eau.
Charge : 45,5 g.

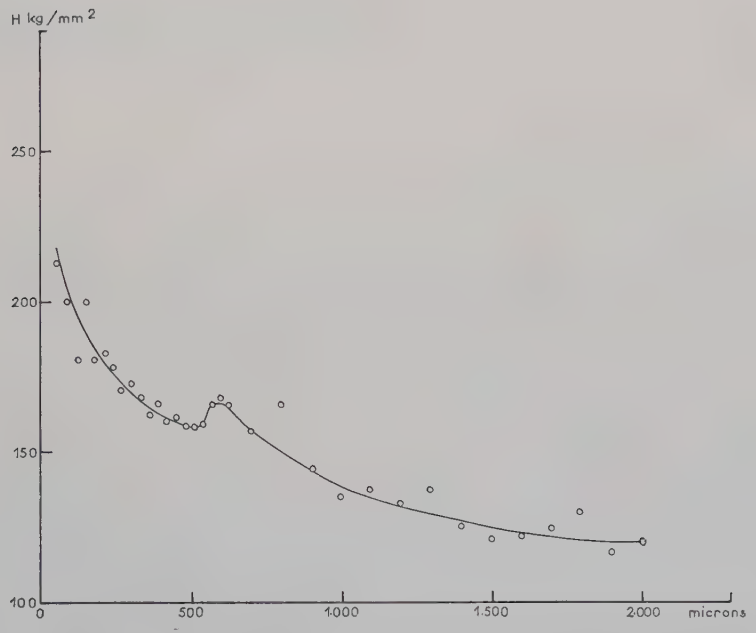


FIG. 22. — XC 10 sulfinusé trois heures à 570° C, trempé dans l'eau et revenu à 300° C une demi-heure.
Charge : 45,5 g.

Dureté de la zone cémentée.

1) *Échantillon A (trempé)* :

On observe que la dureté H décroît d'abord jusqu'à une profondeur de l'ordre de 200 μ, passe par un minimum, croît ensuite, passe par un maximum entre 330 et 360 μ pour redécroître enfin jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur de la dureté à cœur.

2) *Échantillon B (trempé et revenu)* :

La modification morphologique qu'entraîne le revenu effectué à 300° C s'accompagne d'un changement dans l'allure des courbes de microdureté.

Sous la charge de 10,9 g, la courbe dureté-profondeur présente entre 100 et 500 μ non plus deux extrema mais un palier.

Sous une charge plus élevée, celle de 45,5 g, la courbe représentative de H décroît faiblement jusqu'à 500 μ ; le minimum et le maximum précédemment observés se retrouvent mais avec des amplitudes beaucoup plus faibles (fig. 20 et 22).

2) On a voulu reprendre une seconde série de mesures sur deux échantillons, l'un d'acier doux comme le précédent, l'autre de fer *ARMCO*, également trempés à l'eau à la sortie du bain, de dimensions identiques à A et B, mais traités séparément, pour examiner si le phénomène pouvait être reproduit.

Pour les deux échantillons, les deux extrema ont disparu. On observe uniquement un palier qui se situe entre 160 et 300 μ.

IV. RELATIONS ENTRE LA STRUCTURE SUPERFICIELLE ET LES PROPRIÉTÉS DE FROTTEMENT

Les propriétés de frottement sont en relation, d'une part, avec une couche superficielle d'une épaisseur de quelques microns que nous étudions dans ce chapitre, d'autre part, avec les couches sous-jacentes sur une profondeur de l'ordre du dixième de millimètre.

A. ESSAIS AVEC LUBRIFIANT

1. Évolution du relief microgéométrique.

On est parti d'éprouvettes usinées au tour dont les surfaces de frottement avaient un relief microgéométrique correspondant à des valeurs R_a comprises entre 0,5 et 2,5 μ. Au cours des essais, les surfaces se polissent et R_a diminue. Si on se place dans des conditions qui, en aucun cas, n'entraînent le grippage (que les éprouvettes soient traitées ou non), R_a se stabilise à une valeur plus élevée pour les éprouvettes traitées que pour celles non traitées. Or, si on augmente la sévérité de l'essai, par exemple en supprimant la rotation de l'éprouvette supérieure dans le cas où on utilise deux galets, on constate que ce sont les éprouvettes pour lesquelles R_a est le plus petit qui grippent.

Le tableau suivant, qui donne également les pertes de poids des éprouvettes, montre un exemple de cette observation générale :

Tableau II.

Perte de poids (mg).

ESSAIS	NATURE DES ÉPROUVETTES	MOUVEMENT	R + G				G			
		Charge (kg)	20		100	200	20, 100, 200		200	
		Position	I	S	I	S	I	S	I	S
1	XC 10		0	0	1	1	Grippage sous 100 kg			
2	XC 10 traité		27	29	12	14	11		2	3
			Hauteur moyenne des irrégularités de niveau (μ)							
1			0,3	1	0,04	0,095				
2			0,7	0,55	0,25	0,25				

R + G : roulement et glissement.
G : glissement obtenu en supprimant la rotation du galet supérieur.
I : éprouvette inférieure.
S : éprouvette supérieure.

On peut constater que l'usure des éprouvettes traitées est plus importante que celle des éprouvettes non traitées. Cependant, le taux d'usure diminue au cours de l'essai pour devenir négligeable.

2. Comportement de la couche superficielle.

1. Porosité.

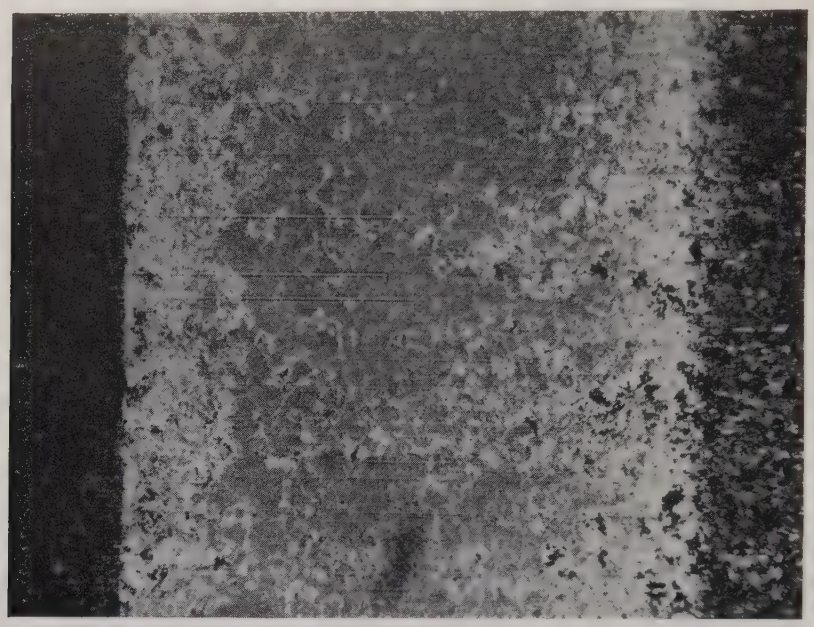
Les éprouvettes traitées présentent un aspect poreux.

Cette porosité est bien visible sur la macrographie de la figure 23. Cette figure représente l'empreinte produite par le frottement du galet inférieur sur le galet supérieur dont on a supprimé la rotation.

L'examen micrographique permet également de rendre compte du comportement de la couche superficielle apportée par le traitement. Cet examen, qui a succédé aux essais de frottement, a eu lieu après coupe des éprouvettes d'essai perpendiculairement et parallèlement à leur surface plane.

2. Discontinuité.

Sur les fontes, l'examen a montré que, lorsque des lames de graphite affleuraient le bord de l'échantillon, la couche superficielle était interrompue pour pénétrer parfois entre les lames et la perlite, les séparant ainsi sur une certaine profondeur. Il apparaît que c'est sur cette profondeur que le graphite est le plus facilement extrait sans que la perlite, protégée par la couche superficielle, en souffre par la suite ; les cavités ainsi aménagées servent alors de réservoirs à l'huile (fig. 24).



Fer *ARMCO* G. 70 *a*) sans attaque

Fer *ARMCO* G. 70 *b*) réactif : nital 2 %

FIG. 23. — Macrographie de l'empreinte de frottement d'une éprouvette cylindrique traitée, témoignant de la porosité de la surface de frottement.

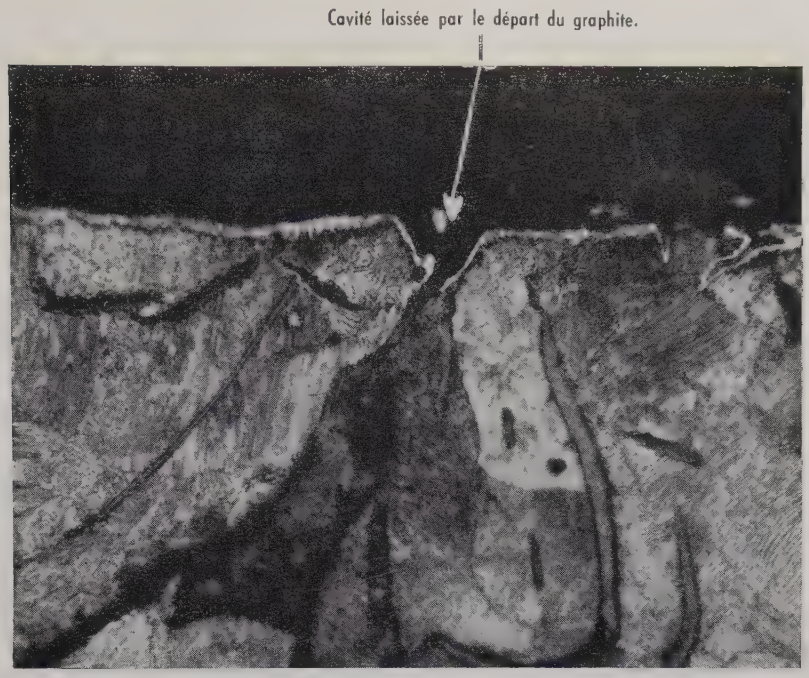


FIG. 24. — G. 670.

Le rôle du graphite sera illustré par une observation de la variation de f au cours des expériences à sec décrites plus loin.

3. Disparition de la couche superficielle.

Sur du fer *ARMCO* traité, où la couche superficielle est continue, contrairement aux fontes, on est parvenu, en faisant frotter un coussinet sur un galet, à une usure inégale de la couche superficielle sur les deux éprouvettes.

On constate (fig. 25) que la couche superficielle du coussinet ne subsiste pratiquement plus, alors que celle qui recouvre le galet est demeurée pratiquement intacte, sans arrachement.

La constatation que la couche superficielle ne susbsiste plus sur l'une des deux éprouvettes est en accord avec le fait établi (4) que le frottement de deux solides est plus facile lorsque leur contact a lieu entre des surfaces de natures différentes. On peut en conclure dans le cas présent que le contact entre la couche superficielle et la matrice riche en précipités offre la meilleure résistance à l'usure et au grippage en présence de lubrifiant.

On peut, d'autre part, se demander pourquoi la couche superficielle a disparu sur le coussinet plutôt que sur le galet. La raison doit en être recherchée dans le fait que le coussinet offre au frottement une surface moins importante que le galet ; une particule déterminée de la surface de contact du coussinet est soumise au frottement en permanence, tandis qu'une particule située sur la surface frottante du galet ne l'est que pendant une fraction de temps seulement. C'est donc la particule située sur le coussinet qui aura tendance à être le plus facilement arrachée.

G. BELLANGER (29) a déjà examiné l'influence sur l'usure du rapport des aires des parties frottantes de deux corps en contact, mais en faisant intervenir le rapport de l'aire réelle à l'aire apparente de contact (notion déjà introduite par F. BOWDEN) qu'il qualifie de « fréquence de service ».

La constatation par l'examen micrographique d'une usure inégale des deux éprouvettes correspond d'ailleurs aux indications données par les pertes de poids respectives du galet et du coussinet.

FIG. 25. — Vitesse de glissement perpendiculaire au plan de la figure. G. 670.

A : coussinet. B : galet.

En effet, les pertes de poids totales du coussinet et du galet sont respectivement de 23 et 12 mg. Or, la surface de frottement du coussinet est de 2,35 cm^2 tandis que celle du galet est de 14,10 cm^2 ; le rapport des deux est donc de l'ordre de 1/6.

Ainsi, les pertes de poids par unité de surface frottante du coussinet et du galet sont dans le rapport :

$$\frac{23}{12} \cdot 6 = 11{,}5$$

On peut, de plus, tenter de calculer l'épaisseur de matière enlevée correspondante. Ceci suppose évidemment que cet enlèvement est uniforme sur chaque surface, ce qui n'est pas toujours exact en réalité.

Calculons l'épaisseur h de matière enlevée pour une perte de poids p et une aire de frottement S données d'un matériau de masse spécifique m ; on peut écrire :

$$p = m \cdot S \cdot h.$$

Si on suppose ici que la masse spécifique de la couche superficielle est de l'ordre de celle du fer, soit :

$$m = 7{,}87 \text{ g/cm}^3$$

on a :

$$p^{(g)} = 7{,}87 \cdot S^{(cm^2)} \cdot h^{(cm)}$$

coussinet : $p^{(g)} = 7{,}87 \cdot 2{,}35 \cdot h^{(cm)}$ $\qquad h^{(cm)} = \dfrac{p^{(g)}}{18{,}5}$

galet : $p^{(g)} = 7{,}87 \cdot 14{,}10 \cdot h^{(cm)}$ $\qquad h^{(cm)} = \dfrac{p^{(g)}}{110}$

pour le coussinet qui a perdu 23 mg :

$$h = \frac{23 \cdot 10}{18{,}5} = 12{,}5\ \mu$$

pour le galet qui en a perdu 12 :

$$h = \frac{12 \cdot 10}{110} = 1\ \mu$$

Si on mesure l'épaisseur de la couche superficielle sur le galet ou sur une coupe d'une partie du coussinet n'ayant pas frotté, on trouve bien qu'elle est comprise entre 12 et 15 μ.

3. Conclusion des essais avec lubrifiant.

Il n'est pas nécessaire, pour obtenir de bonnes conditions de lubrification, de pousser la « finition » des surfaces de frottement au cours de l'usinage. C'est lorsque cette finition est très poussée, ou le devient par nivellement au cours du frottement, que les risques de grippage sont les plus élevés, phénomène constaté d'ailleurs dans la pratique.

Il est donc intéressant d'arriver à une stabilisation du relief microgéométrique à un degré de nivellement qui ne soit pas trop poussé. La morphologie de la couche superficielle des surfaces traitées permet d'atteindre ce but.

B. ESSAIS A SEC

Comme on l'a dit, on a examiné ici principalement comment variait le coefficient de frottement. D'autre part, l'usure des éprouvettes n'est plus négligeable et on a tenté également d'étudier son évolution.

Dans des conditions sévères (charge ou vitesse élevée), les éprouvettes non traitées grippent immédiatement ou rapidement et on ne peut faire l'étude du coefficient de frottement. Au contraire, cette étude est intéressante dans le cas des surfaces traitées. En revanche, il est intéressant d'observer la variation de l'usure au cours du mouvement avec des éprouvettes non traitées, lorsque les conditions de l'essai n'entraînent pas un grippage.

1. Variation de f avec la vitesse et la charge.

1. Mesures.

f varie avec la vitesse et la charge lorsque les éprouvettes sont traitées. Voici les résultats obtenus avec deux galets en fer *ARMCO* traités :

Tableau III.

Charge appliquée (kg)	200	200	20	20
Vitesse de glissement (cm/s).	189	94,5	94,5	9,45
Durée de l'essai (mn)	5	7,5	7,5	3,8
Perte de poids totale (mg)	28	36	27	28
Coefficient de frottement en fin d'essai ..	0,13	0,16	0,21	0,41

On constate que, dans les conditions les plus sévères, le coefficient de frottement est environ trois fois plus petit que dans les conditions les moins sévères.

D'autre part, on peut remarquer que, sous la charge de 20 kg, les usures sont du même ordre malgré une variation de vitesse dans le rapport de 10 à 1 et de durée de l'essai dans le rapport de 2 à 1.

On doit encore noter que, si on tente d'appliquer avec une vitesse de glisement peu élevée une charge croissante, il faut arrêter l'essai lorsqu'on atteint la charge de 130 kg, car le couple atteint alors la valeur maximale que l'on puisse enregistrer sur la machine, soit 150 kg·cm, ce qui correspond ici à une valeur de f égale à 0,54.

2. Justification par la théorie de Bowden.

Pour les surfaces traitées, f diminue donc lorsque la vitesse augmente.

Autrement dit, en s'appuyant sur la théorie de Bowden rappelée au début de cet exposé, on constate que la force de cisaillement nécessaire pour rompre les jonctions établies par soudure des par-

ticules des deux éprouvettes en contact décroît ici en fonction de la rapidité de ce cisaillement. On peut proposer comme explication à ce fait que la soudure de deux particules en contact n'a pas le temps de se produire entièrement avant que le cisaillement résultant du glissement n'ait eu lieu et que la nature de la couche superficielle se prête à ce comportement. A cette rapidité du cisaillement s'ajoute, d'ailleurs, l'échauffement des surfaces qui résulte du frottement.

3. Examen des surfaces par diffraction électronique.

On a pu procéder à un examen par diffraction électronique des surfaces traitées avant et après essai.

Les clichés, pris dans les mêmes conditions, ont révélé le diagramme de Fe_3O_4 (fig. 26) dans le cas des surfaces après essai et seulement un halo dans le cas des surfaces avant essai. Il est donc probable qu'une oxydation superficielle se soit produite au cours du frottement, et on sait (4) qu'une couche d'oxyde abaisse le coefficient de frottement.

FIG. 26.

4. Interprétation.

Indépendamment de cette oxydation, les éléments soufre, carbone, azote, qui entrent dans la couche superficielle d'apport, interviennent dans la réduction du frottement. On sait que les composés sulfurés donnent un bas coefficient de frottement. D'autre part, on peut penser, en rapprochant les valeurs de f de celle obtenue avec le carbone amorphe, soit 0,16 (frottement du carbone sur l'acier et du carbone sur le carbone) (4), que les surfaces sont, au cours du frottement, le siège d'une transformation conduisant à un état de structure identique ou tout au moins voisin de celui de ce corps qui pourrait être produit par la décomposition de la cémentite contenue dans la couche superficielle, cette décomposition étant déjà possible, suivant COLLARI et VIRDIS (15), au cours même du traitement.

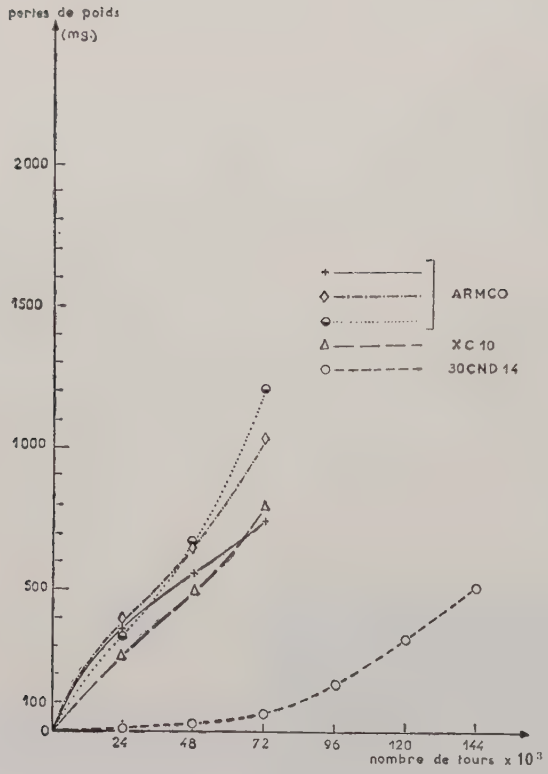
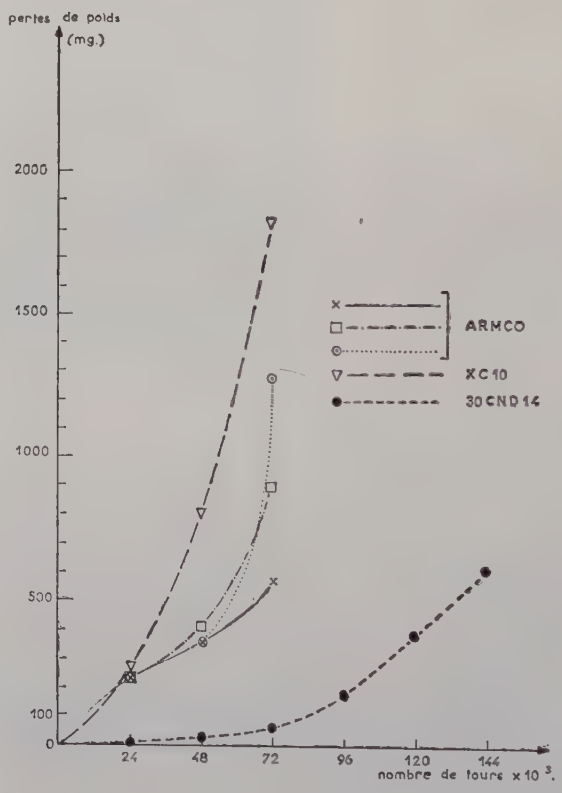


FIG. 27 *a*. — Éprouvette inférieure S. Essai à sec (r. et g.).

FIG. 27 *b*. — Éprouvette supérieure S. Essai à sec (r. et g.).



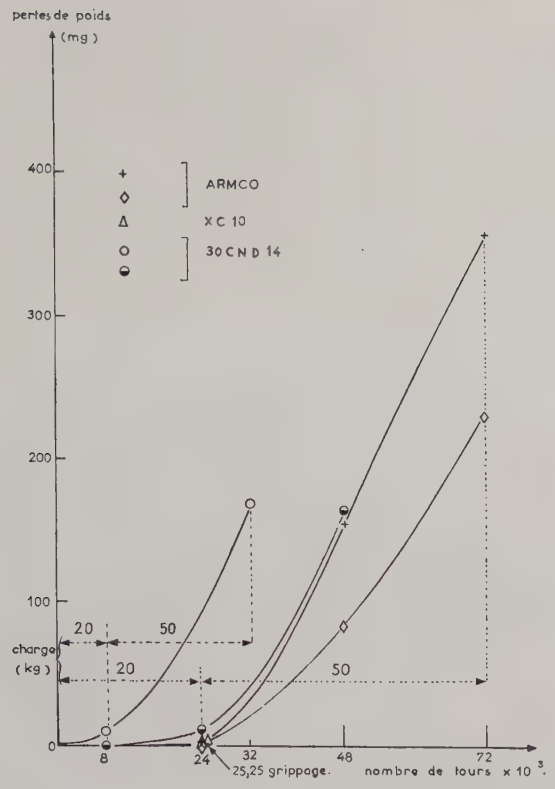


FIG. 27 *c*. — Éprouvette inférieure N. S. Essai à sec (r. et g.).

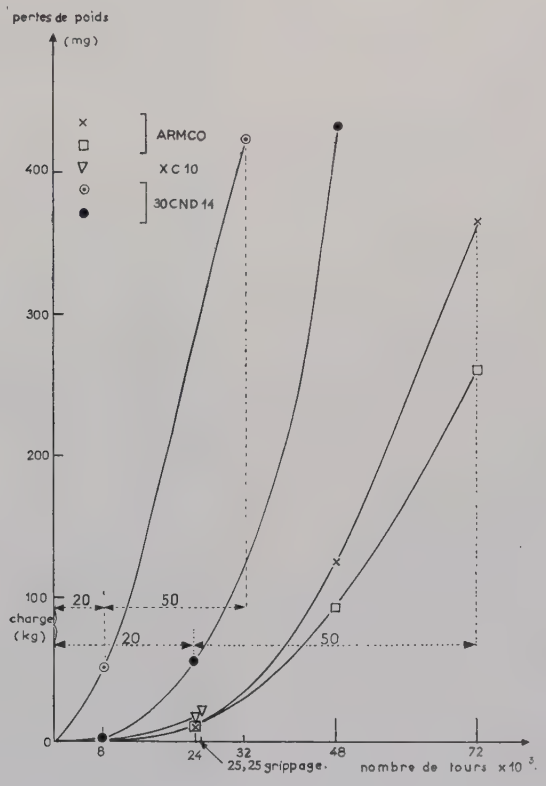


FIG. 27 *d*. — Éprouvette supérieure N. S. Essai à sec (r. et g.).

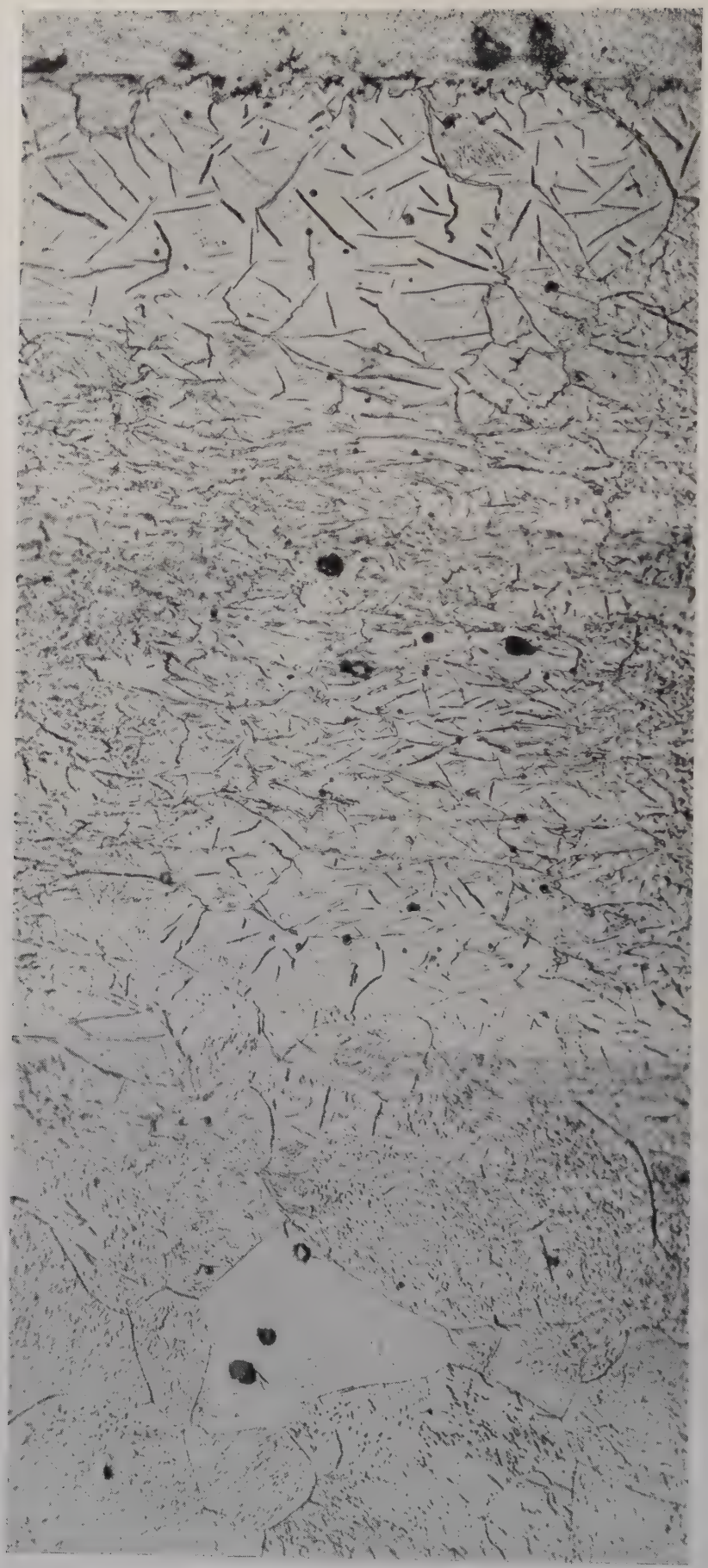
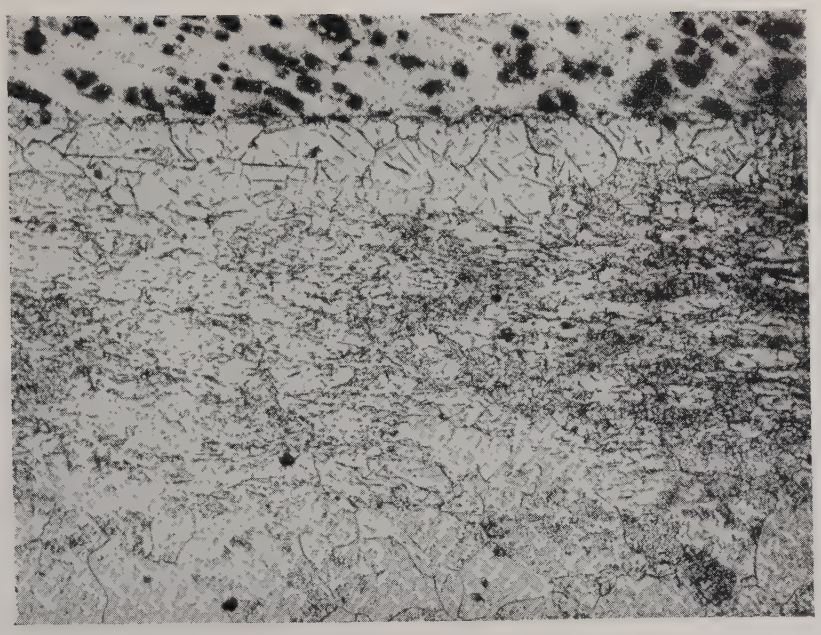
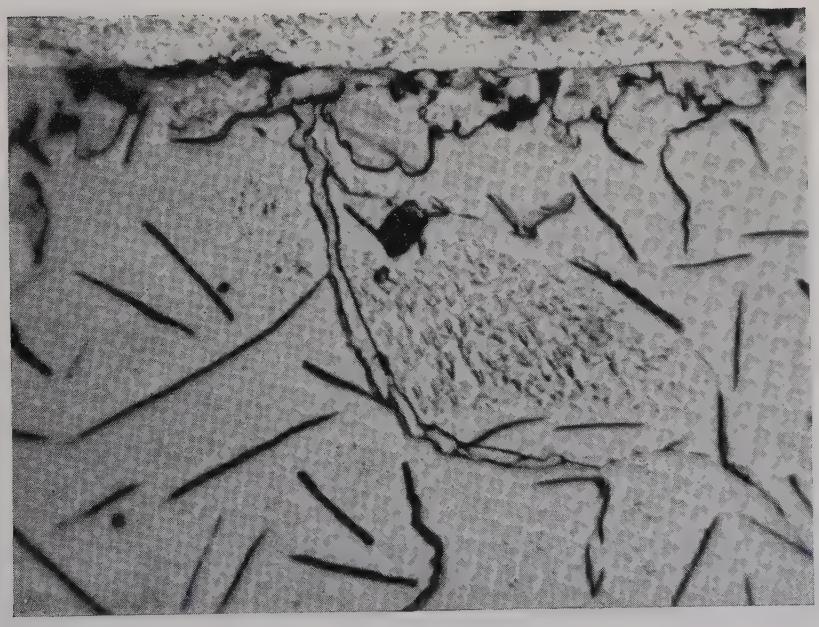


FIG. 28. — G. 450.



G. 150.

FIG. 28.



G. 1 500.

2. Variation de f au cours du mouvement.

Voici les résultats d'expériences effectuées avec couples galet-coussinet en fonte traités. Comme pour les essais avec lubrifiant, les coussinets étaient en fonte R et S, les galets en fonte G. La charge appliquée était égale à 5 kg.

Les éprouvettes ne grippent pas jusqu'à 127 000 tr pour la fonte R, jusqu'à 79 000 tr pour la fonte S. On observe qu'après un palier où les éprouvettes ne s'usent pas, les usures sont régulièrement croissantes jusqu'au grippage. Il y a lieu de constater que le passage de ce palier à la partie croissante de chaque courbe s'accompagne d'une variation du coefficient de frottement f. Celui-ci par exemple passe de 0,35 à 0,60 entre 28 000 et 52 000 tr pour la fonte S. A ces variations de f correspond d'ailleurs une variation de la température des éprouvettes. Cette température, à l'endroit où le thermocouple est placé, passe de 50 à 100° C pour la fonte R, de 40 à 80° C pour la fonte S.

Une interprétation simple peut être donnée de ces résultats en s'appuyant sur la coupe métallographique de la figure 24 quoique celle-ci, rappelons-le, soit relative à un essai ayant eu lieu avec du lubrifiant. Comme on l'a dit plus haut, cette figure représente une section de la chemise de fonte R traitée. La couche superficielle, comme on a pu l'observer, pénètre entre la matrice perlitique et les lamelles de graphite affleurant la surface libre. Sous l'effet du frottement, le graphite est extrait de la matrice et s'étale sur la surface de contact, ce qui donne un bas coefficient de frottement, les cavités que son départ laisse étant protégées par la couche en question, ce qui évite le grippage. On doit penser que c'est seulement lorsque le dépôt superficiel de graphite a été éliminé que le coefficient de frottement croît et qu'au bout d'un certain temps, la couche superficielle étant détruite et ne jouant plus son rôle protecteur, les surfaces grippent.

3. Évolution de l'usure.

En faisant rouler et glisser deux galets l'un sur l'autre sous des charges de 20 et 50 kg, on a pu suivre l'évolution de l'usure au cours du temps.

On a comparé le comportement du fer *ARMCO*, de l'acier doux et de l'acier 30 CND 14 traités et non traités.

On observe (fig. 27 *a*, *b*) que pour le fer *ARMCO* et l'acier doux ce sont les éprouvettes traitées qui s'usent le plus et le plus tôt. En revanche, on observe un grippage avec les éprouvettes d'acier doux non traité, ce qui n'a pas lieu lorsque ces éprouvettes sont traitées. (fig. 27 *c* et *d*).

Pour l'acier 30 CND 14 au contraire, l'usure est la plus lente à se produire lorsque les galets sont traités.

On peut penser que la couche superficielle est plus adhérente dans le cas de l'acier 30 CND 14 que dans les cas précédents.

4. Conclusion des essais à sec.

Il n'est pas apparu, au cours des essais précédents, de relation entre le coefficient de frottement et l'usure.

Ce que l'on peut dire, c'est que tant que la couche superficielle n'est pas éliminée, on a une usure faible et indépendante des conditions de vitesse et de charge. Le coefficient de frottement, au contraire, varie avec ces deux derniers paramètres.

Ce n'est que dans le cas où l'on a admis une intervention du graphite que celui-ci, jouant le rôle de lubrifiant solide entre les éprouvettes, a donné lieu simultanément à une valeur faible du frottement et de l'usure.

Lorsque la couche superficielle a disparu, l'usure augmente et sa valeur est reliée à la structure du métal sous-jacent, le coefficient de frottement variant peu d'un type d'alliage ferreux à l'autre.

On doit donc penser qu'usure et coefficient de frottement sont reliés à des propriétés distinctes du métal. Le coefficient de frottement est par exemple étroitement dépendant de la composition chimique des surfaces frottantes. L'usure est au contraire principalement reliée à la cohésion des particules qui constituent ces surfaces.

V. RELATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS DE FROTTEMENT ET LA STRUCTURE DES COUCHES SOUS-JACENTES A LA SURFACE

On a examiné dans ce chapitre comment se comportaient, sous l'action du frottement, les couches sous-jacentes à la surface libre. Ces couches sont aussi différemment affectées suivant que l'on se place dans le cas du frottement lubrifié ou du frottement sec. L'étude a porté sur du fer *ARMCO* et de l'XC 10, donc des structures ferritiques et des structures à faible teneur en perlite.

Certaines de nos observations pourront être rapprochées de celles faites en minéralogie où l'étude du glissement des roches peut être reliée à l'orientation des plans de clivage des cristaux qui les constituent (30).

A. ESSAIS AVEC LUBRIFIANT

1. Déformations produites au cours du frottement.

La constatation de déformations permanentes ou de rupture des plaquettes de nitrures précipités permet, dans le cas des surfaces traitées, de se rendre compte des déformations correspondantes du métal.

Ainsi, considérons un galet de fer *ARMCO* traité soumis à un essai de roulement et glissement sur un second galet identique. La charge appliquée a été au cours de l'essai successivement de 20, 100 et 200 kg, et la vitesse du galet inférieur de 400 tr/mn. Une coupe du galet supérieur a été faite après essai, perpendiculairement aux faces planes du galet. On observe sur la figure 28 que les précipités situés immédiatement sous la surface de frottement sont relativement peu déformés sur une profondeur correspondant à environ 50 μ. Les déformations vont ensuite en augmentant et sont les plus importantes dans une zone comprise entre 100 et 200 μ. Après quoi elles vont en décroissant vers l'intérieur de l'échantillon. Or, le calcul a donné (chapitre II) 170 μ pour la profondeur maximale de cisaillement ; on peut donc admettre qu'il y a correspondance entre ces chiffres.

La déformation des précipités est également fonction de leur orientation comme le montre la figure 29. Un examen par réplique en microscopie électronique permet d'observer (fig. 30) qu'il peut y avoir soit déformation, soit rupture des plaquettes. Leur déformation témoigne d'une certaine ductilité de ces plaquettes sous l'influence des contraintes menant à la déformation plastique.

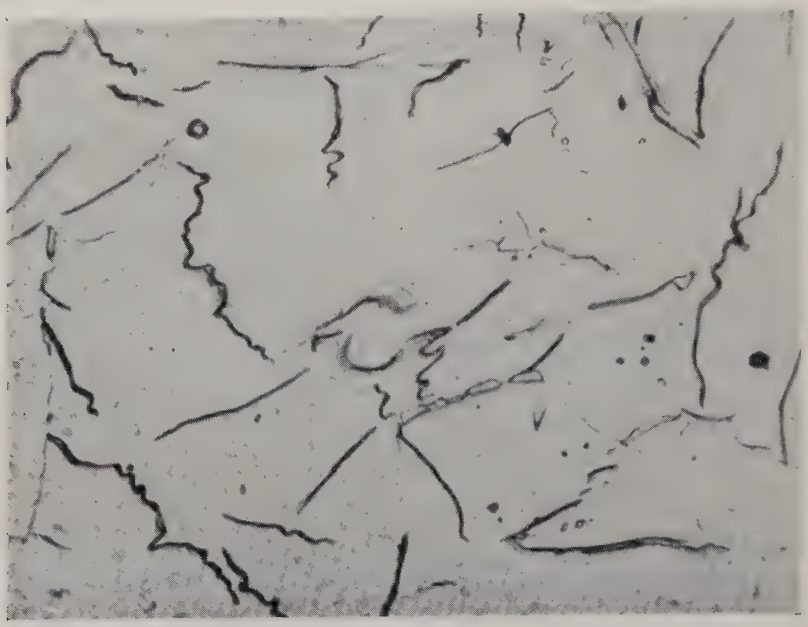


FIG. 29. — G. 1 500.

2. Durcissement produit au cours du frottement.

On a repris avec de l'XC 10 les expériences de WELSH ; comme on l'a vu, ces expériences étaient réalisées en faisant rouler ou rouler et glisser les éprouvettes l'une sur l'autre. On a pu ici les étendre au cas du glissement pur grâce au traitement de surface utilisé qui repousse la limite de grippage.

Il importait, pour pouvoir comparer les durcissements produits par les différents types de frottement sur les éprouvettes traitées, que ces éprouvettes aient été traitées dans des conditions identiques. En effet, on a vu au chapitre III que le durcissement dû au traitement pouvait varier d'un traitement à l'autre.

On a donc traité simultanément une série d'éprouvettes pendant vingt heures. Chaque essai a eu lieu pour 216 000 tr de l'éprouvette inférieure qui tournait à 400 tr/mn. La charge appliquée a été de 200 kg.

On a, après essai, effectué des mesures de microdureté sous des charges de 20,5 et 45,5 g sur des sections des éprouvettes perpendiculaires à leurs faces planes. Les mesures ont eu lieu depuis la distance de 30 μ de la surface de frottement jusqu'à la profondeur où on retrouve la dureté à cœur. Cette dureté est obtenue à une distance de l'ordre de 1 000 μ pour les éprouvettes non traitées, de 3 000 μ pour les éprouvettes traitées.

La figure 31 donne la variation de la microdureté à partir de la surface libre dans une zone non affectée par le frottement : les mesures ont été faites à partir d'une des faces planes d'un des galets et à 5 mm de la surface de frottement.

1. Influence des différents types de frottement sur le durcissement.

Dans le cas du roulement et du roulement et glissement combinés, la dureté à 30 μ de la surface de frottement est du même ordre que celle à 30 μ de la surface n'ayant pas frotté.

On observe à une certaine distance de la surface de frottement un maximum de la dureté, ce

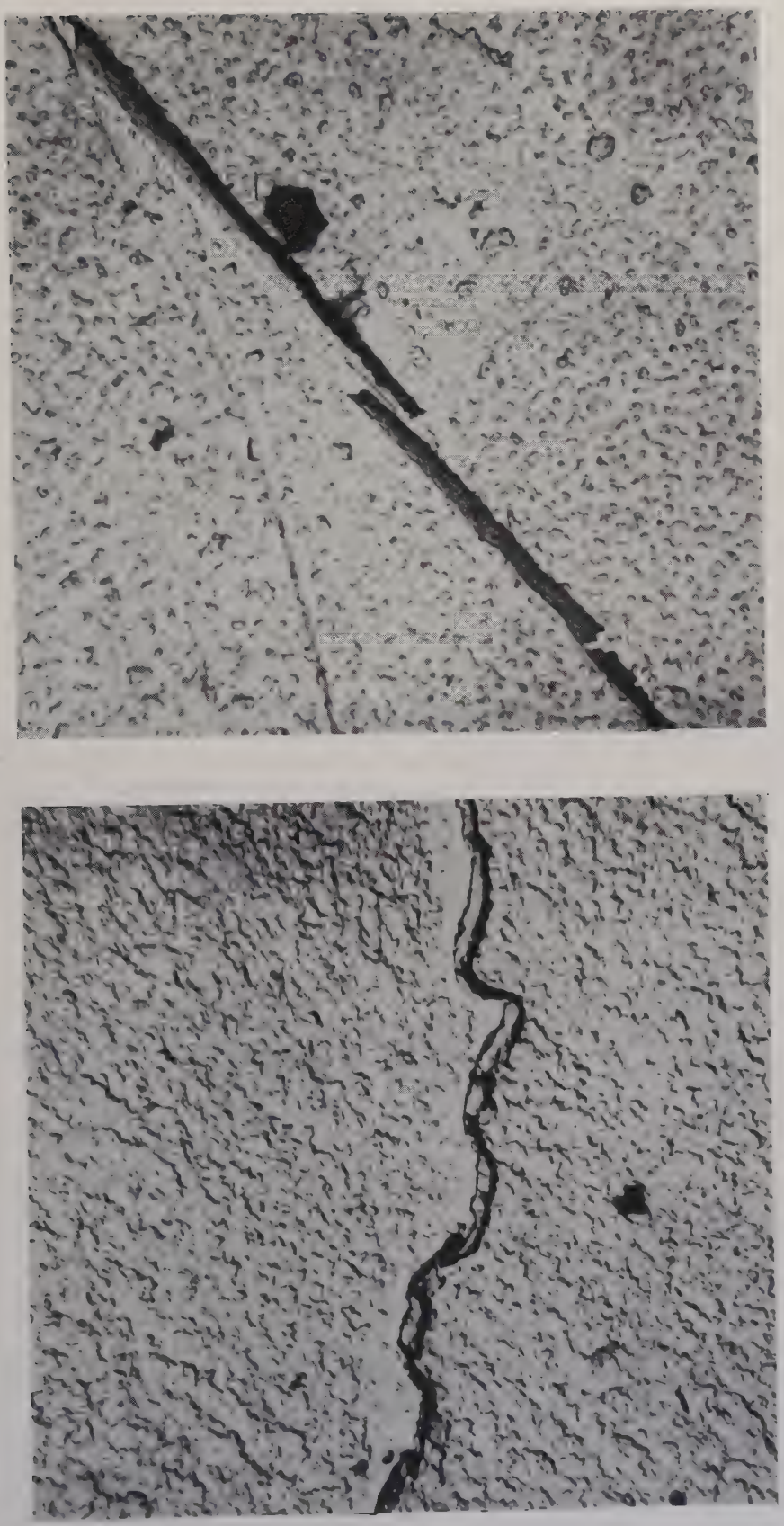


Fig. 30. — G. 16 000
(J. Plateau,
G. Henry).

qui est en accord avec les observations de WELSH et la théorie de HERTZ (on peut considérer l'accord comme assez satisfaisant). On ne retrouve pas ce maximum dans le cas où, avec les surfaces traitées, on a réalisé un mouvement de glisement pur. Dans ce dernier cas, le durcisssement maximal a lieu immédiatement au-dessous de la surface de frottement et la dureté va constamment en décroissant.

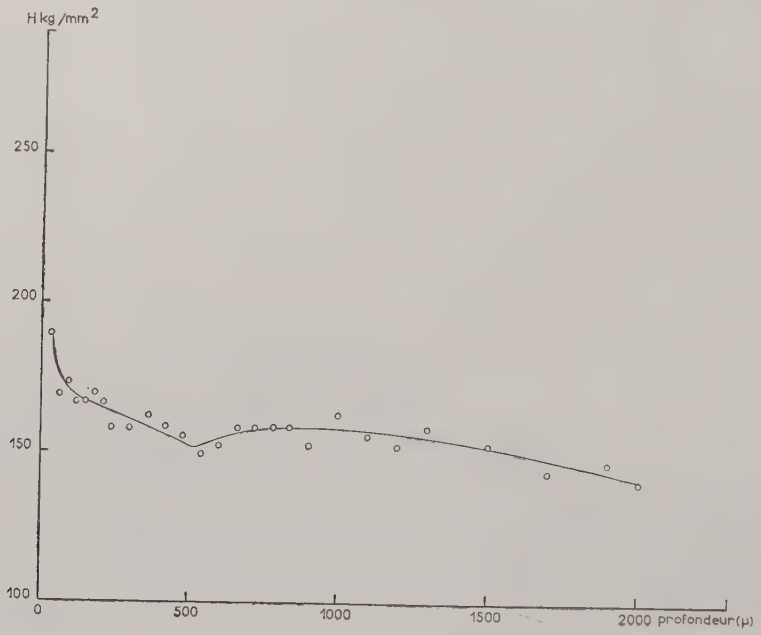


FIG. 31. — XC 10 sulfinusé. Roulement. Mesures faites à partir d'une face plane du galet et à 5 mm de la surface de frottement.
Charge : 20,5 g.

Voici un tableau donnant les duretés maximales et les profondeurs correspondantes.

TABLEAU IV.

MOUVEMENT	TRAITEMENT	MAXIMUM DE DURETÉ			
		Profondeur h (μ)		Dureté H (kg/mm²)	
		I	S	I	S
Roulement	*ns*	150	120	230	260
	s	—	120	—	210
Roulement et glissement	*ns*	60	90	220	270
	s		180		250
Glissement	*s*		30		300

I : éprouvette inférieure ; S : éprouvette supérieure ;
ns : non sulfinusé ; *s* : sulfinusé.

Les figures 32 et 33 donnent les courbes de microdureté correspondant aux éprouvettes traitées et non traitées et aux différents types de mouvement.

On constate que les déformations les plus importantes témoignées par les nitrures ont lieu dans le cas du roulement et du roulement avec glissement relatif et elles sont maximales dans la zone où la dureté est maximale. Les déformations sont très faibles dans le cas du glissement pur.

2. Différences de comportement des deux éprouvettes dans le cas du roulement avec glissement relatif.

On constate dans le cas du roulement avec glissement relatif que le durcissement du galet supérieur est plus élevé que celui du galet inférieur :

C'est une observation que l'on retrouvera dans les essais à sec. Or, dans leur mouvement, ce qui peut distinguer ces deux galets, c'est que, en leurs points de contact, pour le galet inférieur la vitesse relative par rapport au galet supérieur a le même sens que sa vitesse absolue, tandis que pour le galet supérieur c'est l'inverse. D'autre part, le galet supérieur tourne moins vite que le galet inférieur.

3. Différences de comportement des galets traités et non traités.

On constate que, pour le même type de mouvement, le durcissement maximal est plus élevé avec les galets non traités qu'avec les galets traités. Ceci sera également observé lors des essais à sec. Ceci est dû simplement à ce que la structure des couches traitées est plus résistante à l'écrouissage que celle des couches non traitées, les nitrures précipités s'opposant dans une certaine mesure à la déformation.

3. Recherche de l'influence de l'échauffement sur le durcissement.

On peut se demander si l'échauffement en surface produit par le frottement n'a pas une influence sur le fait que la dureté après roulement soit maximale à une certaine profondeur.

Aussi s'est-on efforcé :

De comparer les échauffements produits par les différents types de frottement ;

D'examiner si un revenu pouvait avoir une influence sur le durcissement ;

De voir si le roulement pouvait produire une précipitation sur une éprouvette préalablement traitée et trempée à l'eau.

a. Comparaison des échauffements produits par les différents types de frottement.

Le tableau suivant donne, pour les essais du paragraphe 2 (durcissement produit au cours du frottement), le travail dû au frottement et la température d'équilibre de l'huile dans son récipient :

Tableau V.

Mouvement		Travail dû au frottement, par tour (kgm)	Température de l'huile (° C)
Roulement	Galets non traités.....	0,29	33
	Galets traités	0,23	30
Roulement et glissement	Galets non traités.....	0,35	32
	Galets traités	0,40	30
Glissement	Galets traités	4,6	105

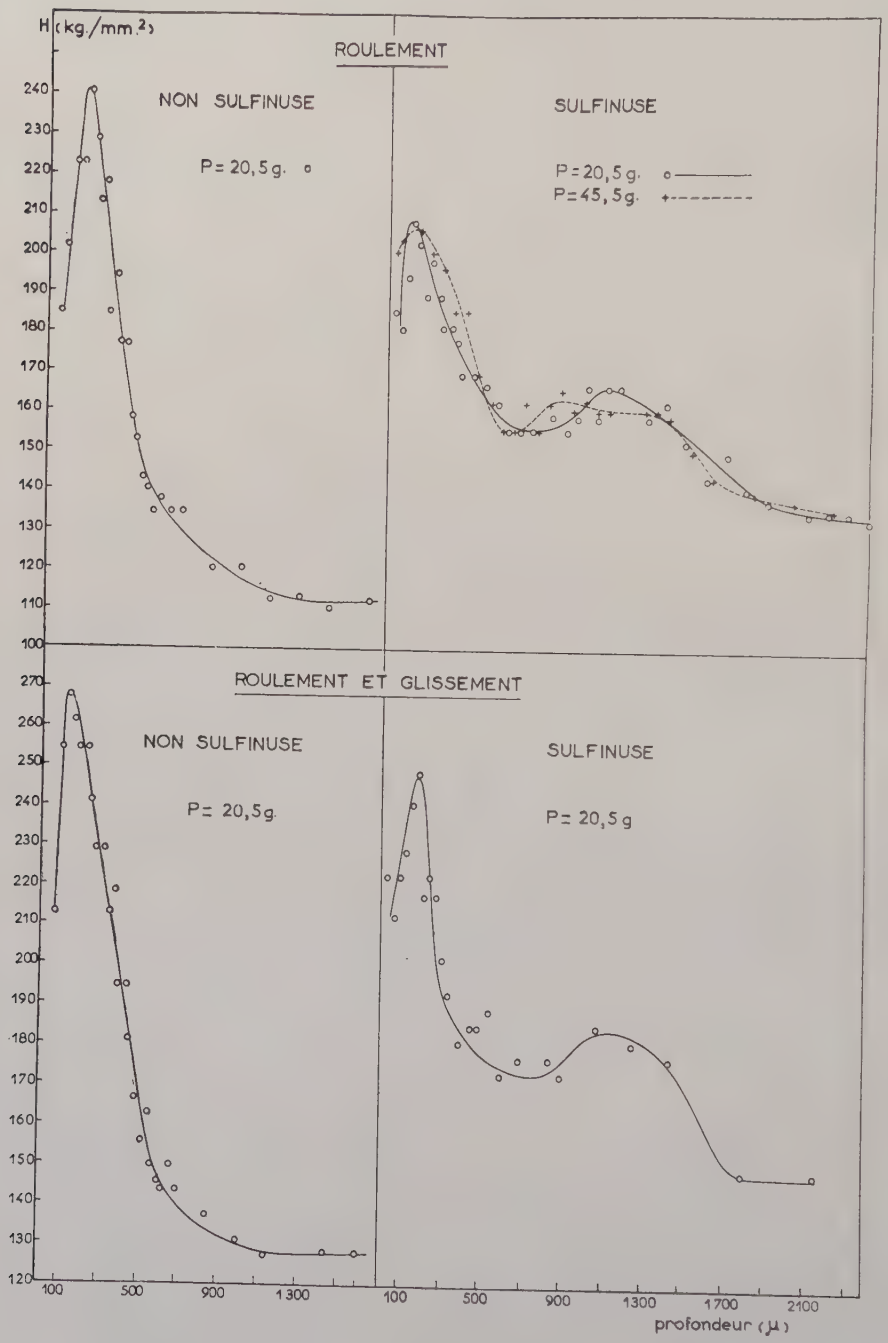


FIG. 32. — Galets acier XC 10. Coupes transversales après essai (galet supérieur).

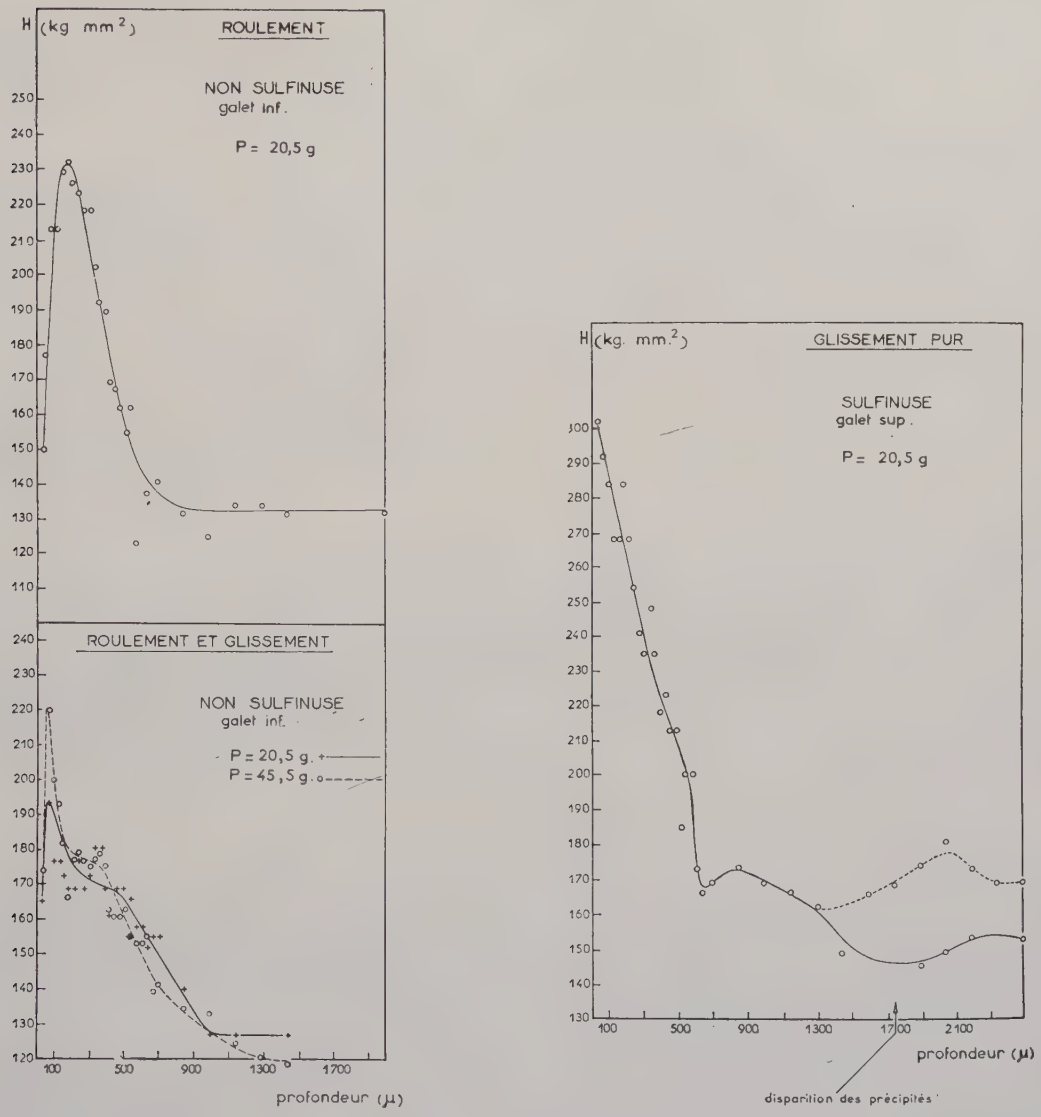


FIG. 33. — Galets acier XC 10.
Coupes transversales après essai.

De ce tableau, on peut conclure que l'échauffement est le plus important dans le cas du glissement pur. Or, c'est dans le cas du glissement pur que l'on n'a pas observé de maximum de dureté.

b. Recherche de l'influence d'un revenu sur le durcissement.

Si l'allure des courbes présentant un maximum de dureté est due à un revenu provoqué par l'échauffement en surface, un revenu effectué après essai, où l'ensemble de l'échantillon est chauffé uniformément, doit avoir une action sur ce maximum. On a donc repris l'éprouvette de fer *ARMCO* du paragraphe 1 (déformations produites au cours du frottement) qui avait subi un essai de roulement et glissement. Une série de mesures a été faite sous la surface de frottement avant et après revenu à 500° C (fig. 34 et 35). Or on constate que ce revenu ne modifie pas la valeur du maximum. Le pic de dureté est seulement moins large après revenu qu'avant. L'aspect micrographique n'est également pas modifié.

Un revenu a été effectué dans les mêmes conditions (une demi-heure à 500° C) sur les échantillons d'XC 10 du paragraphe 2 après roulement et après glissement. On constate encore que dans le cas du roulement le revenu n'a pas d'influence sur le pic de dureté. En revanche, dans le cas du glissement, le revenu a pour effet d'abaisser la dureté.

Cet abaissement est de l'ordre de 100 kg/mm² dans les cent premiers microns de profondeur. L'écart diminue ensuite quand on va vers le cœur de l'échantillon.

c. On sait que, sur un échantillon traité et trempé à l'eau, la précipitation des nitrures se produit sous l'effet d'un revenu à 300° C succédant au traitement. On a recherché si cette précipitation pouvait se produire au cours du frottement. On a donc soumis à un essai de roulement et glissement, dans les mêmes conditions que celles de l'essai correspondant du paragraphe 2, un couple d'éprouvettes d'acier XC 10 préalablement traitées et trempées dans l'eau. Après essai on constate (fig. 36) au-dessous de la surface de frottement l'absence de plaquettes de nitrure. Or, un revenu à 300° C produit cette précipitation de plaquettes (fig. 37). On peut donc admettre que l'on n'a pas atteint 300° C au cours de l'essai dans les grains sous-jacents à la surface de frottement.

4. Conclusion.

On a observé :

Dans le cas du roulement et du roulement et glissement la présence d'un pic de dureté. Le fait que la dureté diminue au voisinage de la surface de frottement ne saurait être attribué à l'effet d'un revenu provoqué par un échauffement en surface. Le maximum de la dureté correspond, d'autre part, à un maximum des déformations.

Dans le cas du glissement pur, la dureté part d'une valeur beaucoup plus élevée au voisinage de la surface ; elle ne passe pas par un maximum ; on n'observe pas de déformations correspondantes.

Il faut en conclure que l'écrouissage a une répartition différente suivant qu'il y a ou qu'il n'y a pas roulement.

Dans le cas où il y a roulement, l'énergie est absorbée en partie par les déformations qui déterminent un relâchement de tensions. Dans le cas du glissement, c'est une restauration produite par le revenu à 500° C qui détermine ce relâchement des tensions.

Les déformations, elles, ne sont pas restaurables. Elles ne peuvent disparaître que par recristallisation, recristallisation qui a d'ailleurs pu être produite par un recuit à 700° C.

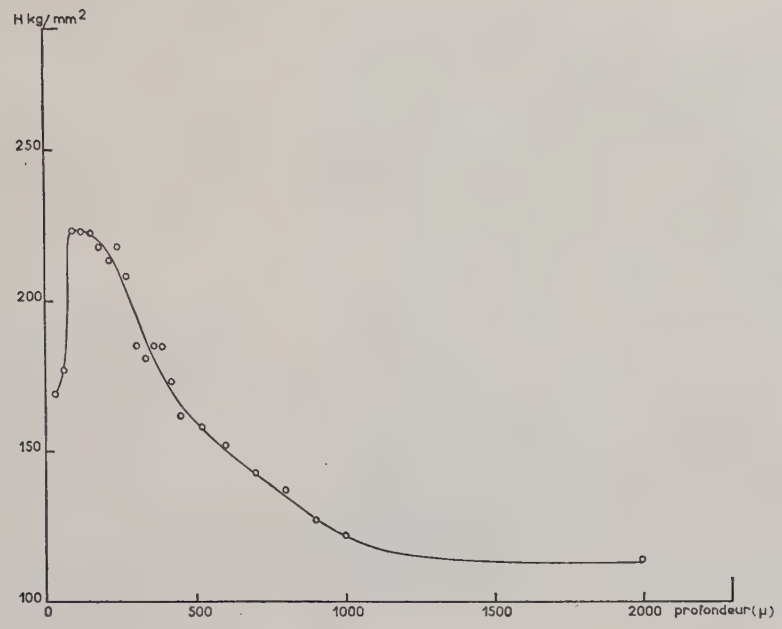
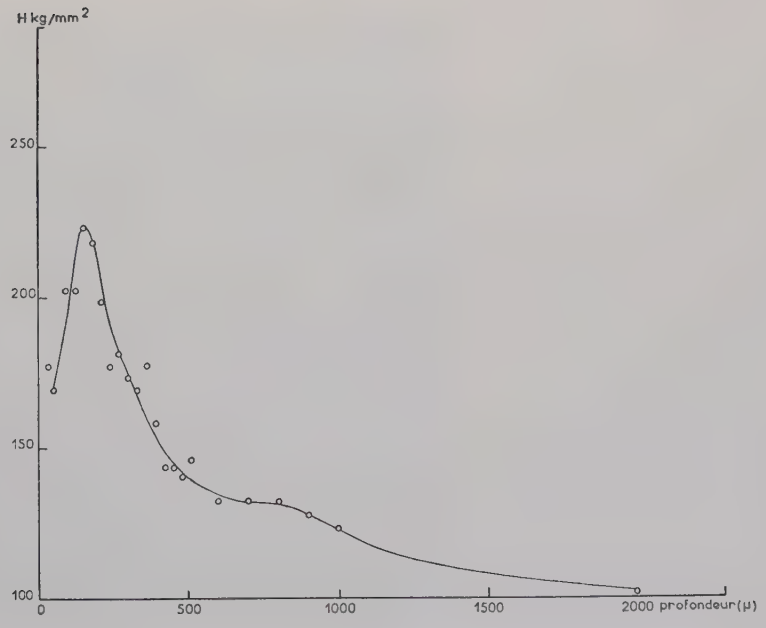


FIG. 34.
Fer *ARMCO* sulfinusé.
Roulement et glissement.
Charge : 20,5 g.

FIG. 35.
Fer *ARMCO* sulfinusé.
Roulement et glissement.
Revenu d'une demi-heure
à 500° C après essai.
Charge : 20,5 g.



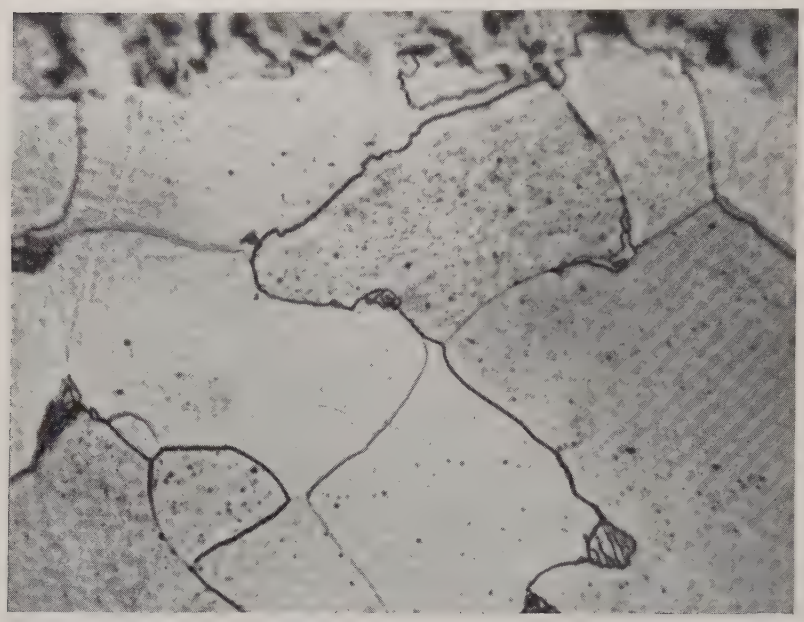


FIG. 36. — G. 1 500

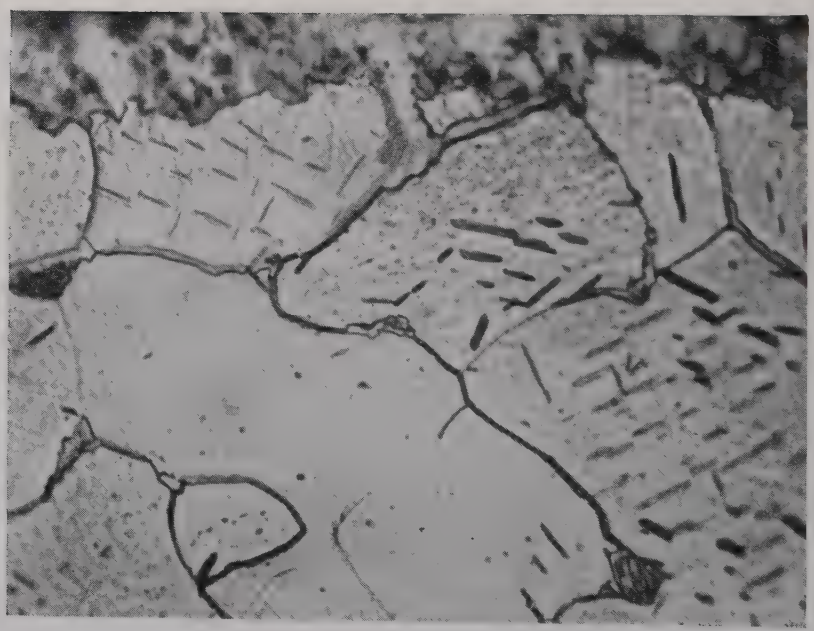


FIG. 37. — G. 1 500.

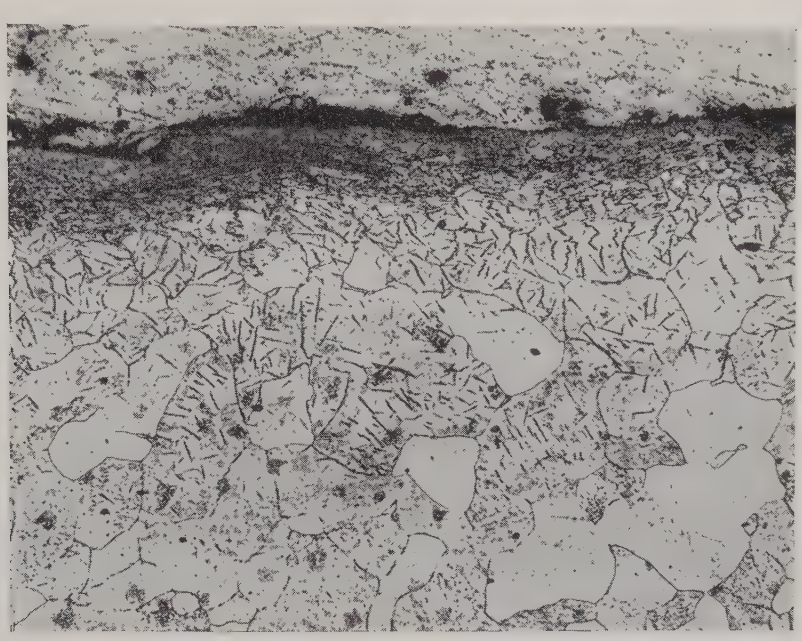


FIG. 38 *a*. — G. 150.

FIG. 38 *b*. — G. 150.

B. ESSAIS A SEC

Comme pour les essais avec lubrifiant, ce que l'on observe est différent suivant les conditions des essais. Lorsque la vitesse de glissement est nulle (roulement) ou faible (roulement avec glissement relatif), les galets s'écrouissent sur une certaine profondeur. Lorsque la vitesse de glissement est élevée, on a observé la formation de macles au-dessous des surfaces de frottement.

1. Essais de roulement et de roulement et glissement.

1. Examen micrographique de l'écrouissage.

On observe, d'une manière générale, une zone écrouie sur une profondeur variable avec la durée de l'essai et la charge qui a varié entre 10 et 50 kg. Comme H. BUCKLE l'avait déjà énoncé (14), lorsque les galets sont traités, la matrice ferritique semble expulsée au bénéfice des précipités qui se serrent et dont la densité va en augmentant (fig. 38 *a* et *b*). On peut donc penser que, lorsque la couche superficielle d'apport a été enlevée, le métal sous-jacent se comporte comme un matériau antifriction : deux corps de dureté différentes sont associés, le moins dur est constitué par la matrice ferritique, le plus dur par les plaquettes de nitrures précipités.

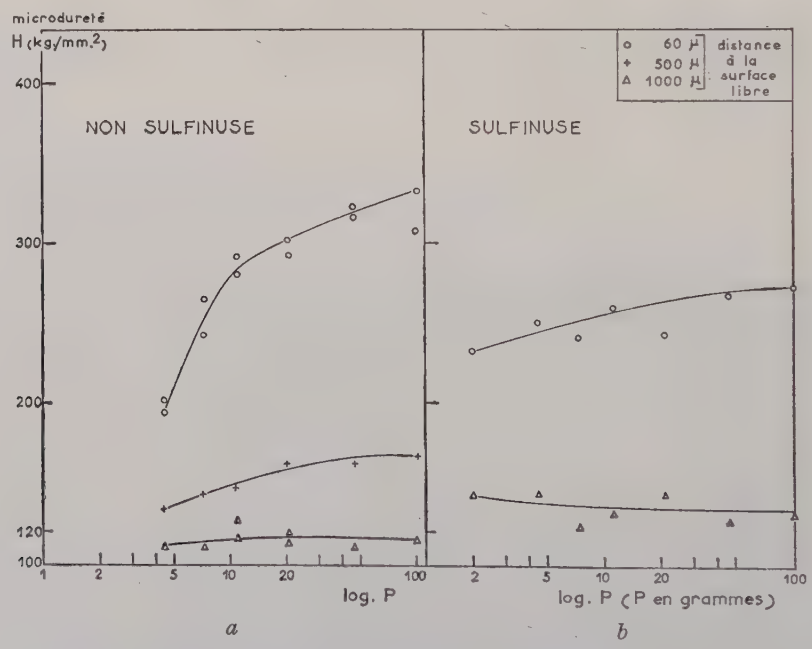


FIG. 39 *a* et *b*. — Fer *ARMCO* écroui par frottement sec.
L'échantillon non sulfinusé est le plus écroui à 60 μ de la surface libre.

Dans le cas du roulement et glissement simultanés on avait constaté, au cours des essais lubrifiés, un maximum de la dureté plus important pour le galet supérieur que pour le galet inférieur. Ici on constate que l'écrouissage a lieu sur une plus grande profondeur, environ double pour le galet supérieur, que pour le galet inférieur ; galet supérieur et galet inférieur sont donc encore différenciés.

2. Mesures de microdureté.

On a effectué des mesures de microdureté sur deux galets, l'un traité, l'autre non traité, après essai dans les mêmes conditions de roulement et glissement. La charge appliquée a été de 20 kg pendant 24 000 tr et de 50 kg pendant 48 000 tr.

Les mesures ont été effectuées à plusieurs distances de la surface libre : 60 μ, 500 μ, 1 000 μ, sous des charges comprises entre 3 et 100 g.

Variation de la dureté en fonction de la distance à la surface libre.

On a obtenu des valeurs décroissantes de la microdureté aux trois distances indiquées (fig 39 *a* et *b*) ; on peut constater d'autre part qu'à 60 μ de la surface libre, c'est l'échantillon non traité qui est le plus dur. On a déjà observé, au cours des essais avec lubrifiant, que le durcissement maximal était plus élevé avec les galets non traités qu'avec les galets traités. Au contraire, à 1 000 μ de la surface libre, c'est l'échantillon traité qui est légèrement plus dur : ici, l'écrouissage ne jouant plus, on retrouve l'augmentation de dureté due à la cémentation.

Relation entre la charge P et le diamètre d'empreinte d.

Les courbes des figures 40 *a* et *b* représentent les variations de log P en fonction de log *d* aux différentes profondeurs. On observe :

— que les courbes représentatives sont des droites sauf celle qui, sur la figure 40 *a*, correspond à la profondeur de 60 μ ;

— en ce qui concerne la variation de l'exposant *n* de la relation $P = ad^n$, il diminue entre 60 et 1 000 μ, donc décroît quand le degré d'écrouissage décroît, ce qui est également conforme à ce que H. Buckle a admis.

2. Essais de glissement pur.

Pour les essais de roulement et de roulement et glissement, on vient d'observer que les couches sous-jacentes aux surfaces de frottement s'écrouissaient d'une façon variable mais toujours importante. Cet écrouissage affectait seulement des couches différentes suivant que l'essai avait lieu à sec ou avec lubrifiant.

Avec lubrifiant, l'écrouissage était maximal à une certaine distance au-dessous de la surface de frottement ; à sec, il allait au contraire en décroissant depuis la surface de frottement.

Pour les essais de glissement pur avec lubrifiant qui n'avaient pu être réalisés qu'avec des éprouvettes traitées, les déformations étaient beaucoup moins importantes. A sec, il n'a pas été possible non plus de réaliser d'essais de glissement pur avec des éprouvettes non traitées, car le grippage est immédiat.

Avec des éprouvettes traitées, le grippage se produit au bout d'un certain temps seulement, le délai de grippage étant fonction de la charge appliquée. Ainsi, pour une vitesse de rotation des éprouvettes de 200 tr/mn, à laquelle correspond une vitesse de glissement de 94 cm/s, le grippage a eu lieu au bout de 31 000 tr sous la charge de 20 kg et entre 6 000 et 8 000 sous la charge de 200 kg.

Les surfaces sont protégées du grippage par la couche superficielle d'apport. Au-dessous de celle-ci, on n'observe pas de déformation si l'essai a eu lieu sous la charge de 20 kg. Sous la charge de 200 kg, le métal s'écrouit ou se macle. On peut observer soit seulement un maclage, soit seulement un écrouissage, soit une zone maclée au-dessous d'une zone écrouie.

Nous nous attacherons particulièrement à analyser deux essais, le premier où l'étude des déformations a été faite après grippage, le second où on a suivi les déformations au cours de l'essai.

Voici les conditions dans lesquelles ont été effectués ces deux essais :

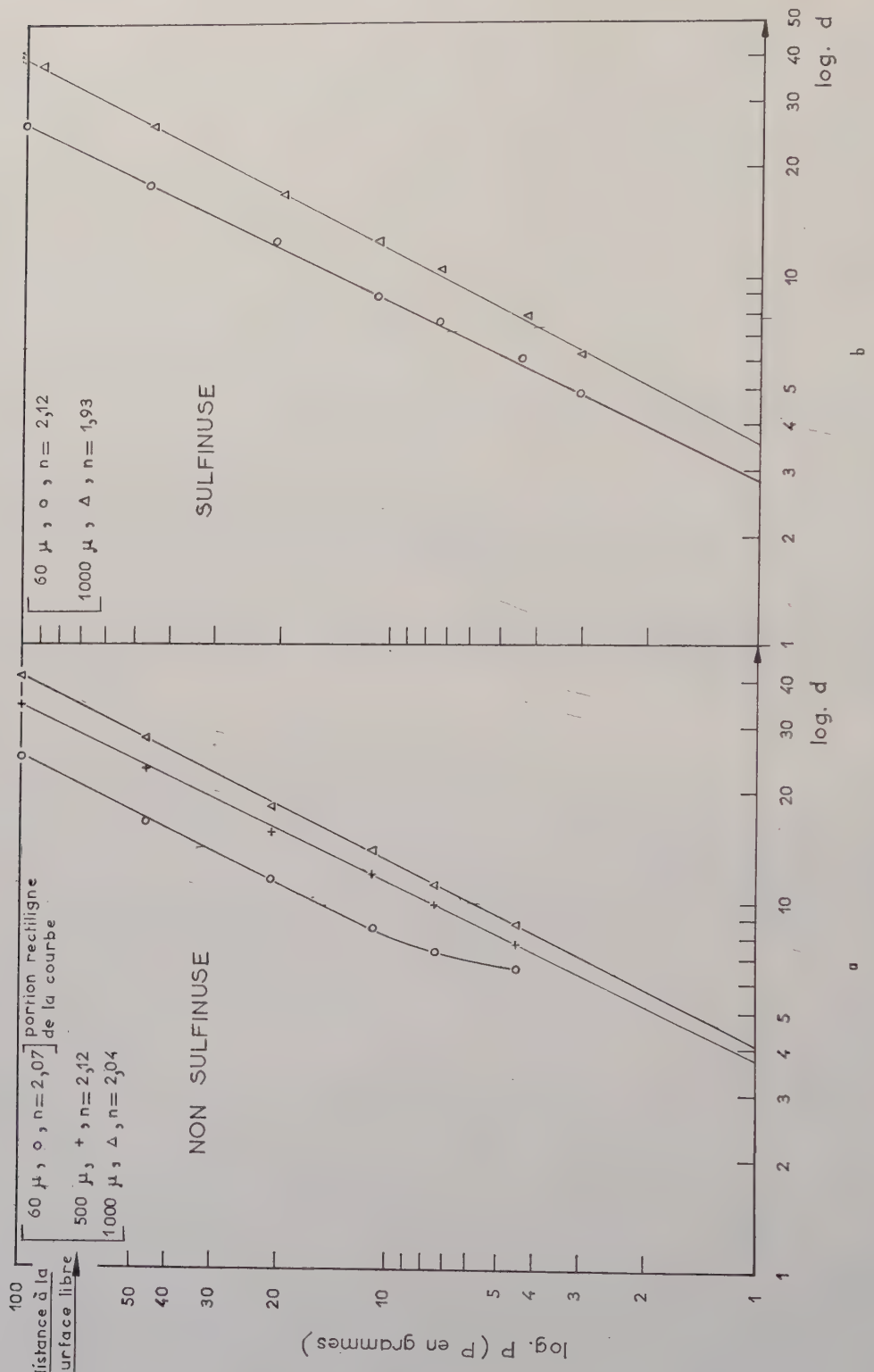


FIG. 40 *a* et *b*. — Fer *ARMCO* écroui par frottement sec.

Tableau VI.

N° DE L'ESSAI	CHARGE (kg)	PRESSION MOYENNE (kg/mm^2)	VITESSE DE GLISSEMENT (cm/s)	DURÉE TOTALE (mn)
A	50 à 200	19 à 77	94	35,8
B	200	77	94	11,3

1. Étude de l'essai A.

Cet essai a donc eu lieu avec des éprouvettes traitées. Les éprouvettes avaient été trempées à l'eau à la sortie du bain de traitement : dans ces conditions de refroidissement, il n'y a pas dans la zone cémentée de précipitation visible des nitrures.

Une partie de ceux-ci précipitera sous l'influence de l'échauffement produit par le frottement, une autre partie sera précipitée sous l'effet d'un recuit effectué après essai.

L'essai a été composé de quatre périodes, avec arrêts, démontages et pesées entre chaque période et conduit jusqu'au grippage, produit au bout de 6 160 tr. Les arrêts ont eu lieu en cours d'essai à 1 500, 3 500 et 5 500 tr.

La charge a été appliquée progressivement de 50 à 200 kg pendant les trois cents premiers tours, à chaque départ.

État de surface, usure, coefficient de frottement.

On peut utilement indiquer comment les pertes de poids ont été réparties au cours de l'essai ainsi que l'évolution de l'état de surface et comment le coefficient de frottement a varié :

Tableau VII.

Éprouvette inférieure.

Tours	0	1 500	3 500	5 500	6 160
R_a (μ)	0,9	0,19	0,38	0,46	—
Δp (mg)	—	22,9	58,8	32,1	Gain 75

Éprouvette supérieure.

Tours	0	1 500	3 500	5 500	6 160
R_a (μ)	1,5	1,2	1,4	0,45	—
Δp (mg)	—	12,6	11,7	50,2	141,7

Tableau VIII.

Coefficient de frottement.

Tours.....	0	1 500	3 500	5 500	6 160
Valeur max. sous 200 kg. .		0,18	0,20	0,25	0,27
Valeur min. sous 200 kg. . .		0,16	0,18	0,21	0,24
Avant arrêt		0,16	0,18	0,21	0,24

On peut observer :
1) Que l'état microgéométrique des surfaces s'améliore en cours d'essai ;
2) Que les pertes de poids restent faibles jusqu'à la pesée précédant le grippage ;
3) Que le coefficient de frottement va en croissant au cours de l'essai.

Déformations observées.

Une coupe métallographique des éprouvettes, parallèlement à leur surface plane, a été exécutée après essai.

Lorsqu'on examine les échantillons polis, sans attaque, la méthode optique du contraste interférentiel fait apparaître (fig. 41) des bandes qui sont des macles, comme nous le prouverons ci-dessous.

L'attaque chimique (fig. 42 et 43) révèle également ces macles. Le réactif d'attaque est une solution d'acide nitrique à 2 % dans l'alcool.

On observe que ces macles sont déformées : leur déformation indique le sens de l'écrouissage superficiel de l'éprouvette, opposé au sens de la vitesse de glissement.

L'attaque chimique révèle également un certain nombre de précipités, certains étant formés le long des macles. On sait que les nitrures Fe_4N précipitent de la solution solide dans les plans {112}. Or, (31) les plans de macles du fer sont également des plans {112}. Il n'est donc pas étonnant que l'on observe une partie de la précipitation le long des plans de macles.

Preuve de l'existence des macles mécaniques.

Pour montrer que les bandes observées étaient bien des macles, et des macles mécaniques, on a effectué une série de recuits sur les échantillons des galets examinés, à plusieurs températures.

Rappelons que les galets avaient été trempés à l'eau à la sortie du bain de « sulfinusation » et que, par conséquent, les nitrures n'avaient pas pu précipiter au cours de ce refroidissement.

L'échauffement produit par le frottement lui-même, auquel succède le refroidissement à l'air des galets lors de l'arrêt, produit déjà une certaine précipitation, particulièrement le long des joints de grains.

Un recuit sur un des échantillons prélevés dans le galet a été effectué à 700° C, soit au-dessus du point eutectoïde du diagramme FeN (590° C) et on l'a fait suivre d'un refroidissement lent. La forme (ligne brisée symétrique) de précipitation des nitrures visibles ensuite à leur intersection avec les bandes témoigne bien (fig. 44) qu'il s'agit de macles.

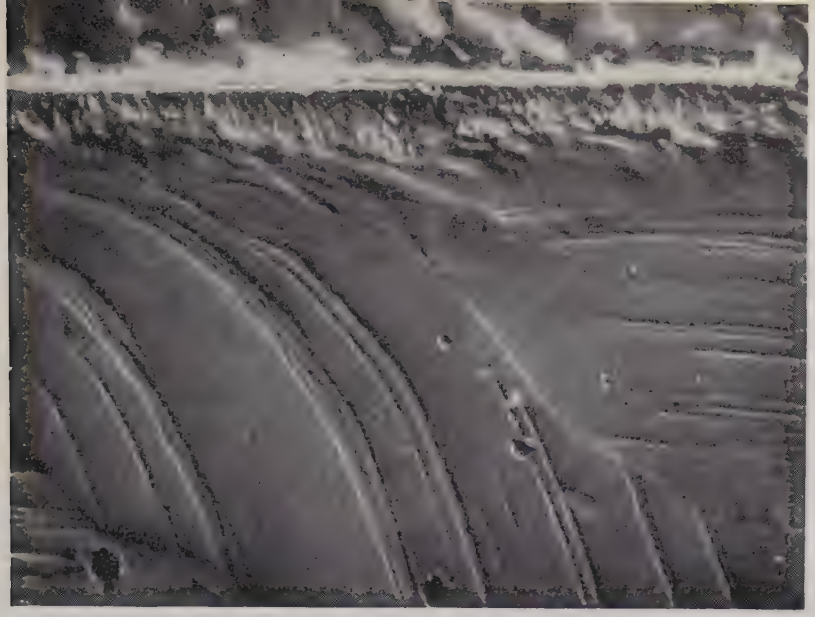


FIG. 41. — G. 450.

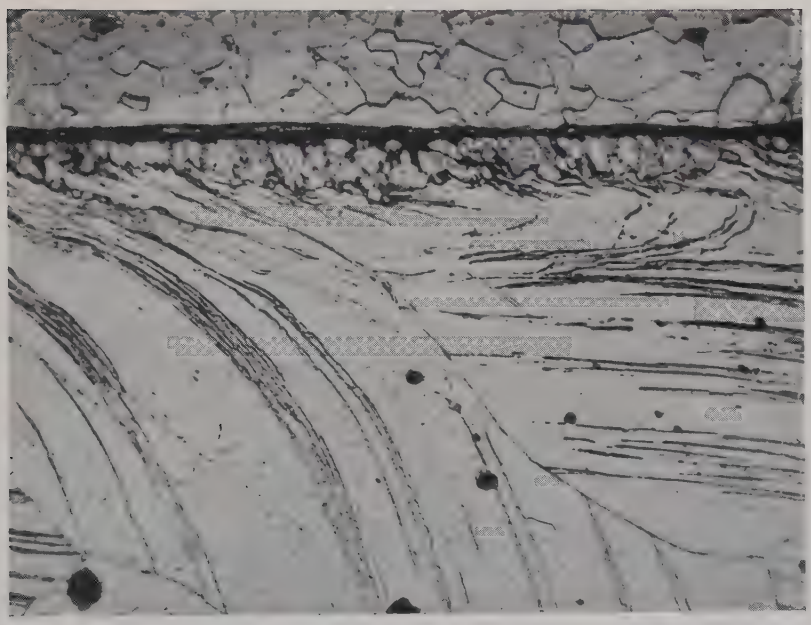


FIG. 42. — G. 450.

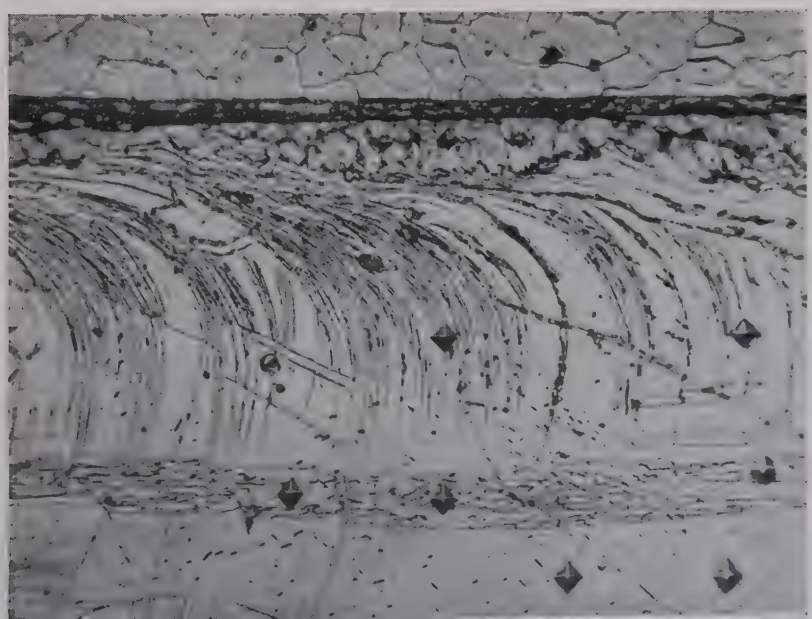
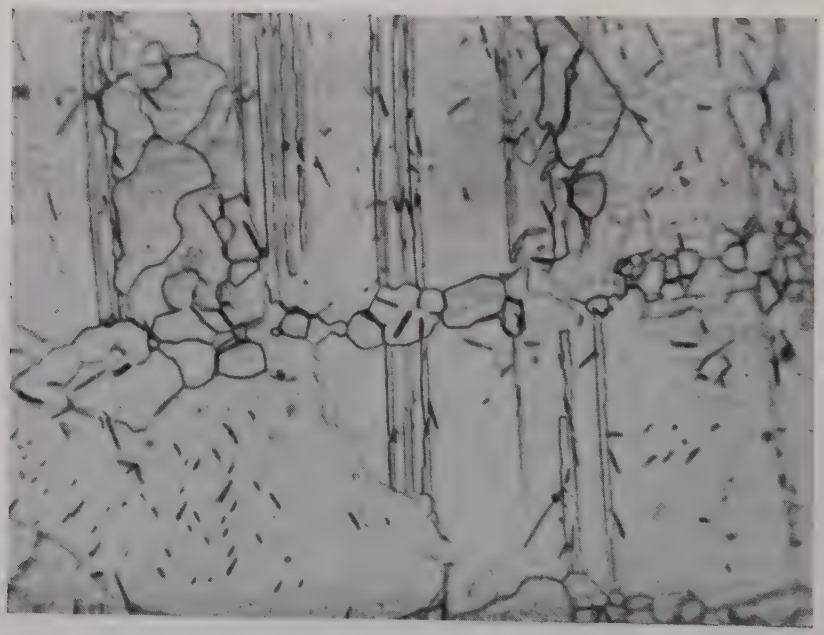


FIG. 43. — G. 450.

FIG. 44. — G. 850.

FIG. 45. — G. 450.



A cette occasion, on a observé une amorce de recristallisation des grains (fig. 45). Cette recristallisation est due à un écrouissage superficiel de l'échantillon qu'entraîne le polissage mécanique qu'il a subi avant recuit.

Mesures de microdureté.

Des empreintes de microdureté effectuées dans la matrice ferritique et dans les bandes donnent à une même distance de la surface libre des valeurs égales de la microdureté ; la dureté des zones maclées est égale à celle des zones non maclées.

Processus de la déformation.

On sait que dans le fer on peut provoquer la formation de macles soit par déformation à basse température, soit par choc à la température ordinaire (32).

La contrainte critique de maclage a été mesurée par JAOUL (33) : elle est de l'ordre de 10 kg/mm². D'après les calculs du chapitre II, la force de frottement a une composante tangentielle qui atteint et dépasse cette valeur.

D'autre part, la température des éprouvettes est au départ la température ordinaire et elle va ensuite en croissant au cours de l'essai, à cause de la chaleur dégagée par le frottement. On ne peut donc expliquer la production de macles comme par déformation à basse température. On est porté à admettre plutôt un mécanisme analogue à celui produit par choc, en assimilant à un choc la mise en charge rapide des éprouvettes à leur surface, puisque les surfaces de contact se déplacent l'une par rapport à l'autre à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde.

2. Étude de l'essai B.

Comme le précédent, cet essai a eu lieu avec des éprouvettes traitées et trempées à l'eau à la sortie du bain de traitement. Comme on l'a dit, on a voulu ici tenter d'observer comment les déformations évoluaient au cours de l'essai.

A cet effet :

L'éprouvette supérieure avait été, avant le traitement, sectionnée suivant un plan perpendiculaire à son axe, en deux portions identiques ;

Après traitement, on avait poli chacune de ces portions sur l'une de ses faces, pour enlever la couche superficielle d'apport et une partie au moins de la zone cémentée (épaisseur enlevée, mesurée au palmer : 0,30 mm) ;

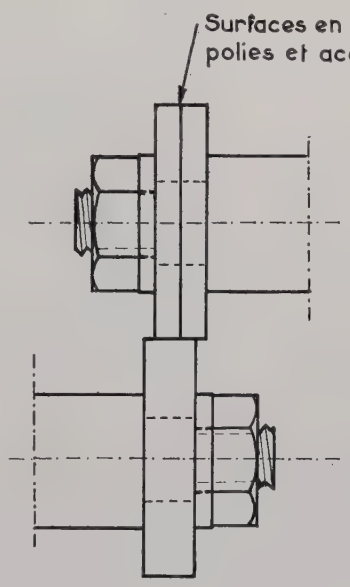


FIG. 46.

Les deux portions une fois polies et accolées donnaient un ensemble d'épaisseur égale à 9,40 mm, monté ainsi sur l'appareil au-dessus du second galet (fig. 46).

La charge de 200 kg (charge maximale applicable) étant établie à chaque départ, l'essai a compris les périodes suivantes :

	1	2	3	4	5	6
Tours.....	0	150	300	450	600	750	2 250

Cet essai n'a pas été poursuivi jusqu'au grippage des éprouvettes. On l'a arrêté lorsqu'on n'a plus constaté d'évolution dans les déformations des galets. A chaque arrêt, les deux demi-galets supérieurs ont été séparés et on a observé leurs surfaces planes en les plaçant sur la platine du microscope. Quant au galet inférieur, une coupe métallographique en a été faite en fin d'essai.

Dès 150 tr on observe, sur la surface polie des deux demi-galets supérieurs, des lignes de glissement qui sont particulièrement bien visibles en contraste interférentiel (fig. 47) ; une attaque chimique fait disparaître ces lignes. On les observe encore après 300 tr, mais après 450 tr on constate leur disparition. Après 600 tr, il apparaît de nouvelles lignes qu'une attaque chimique laisse cette fois-ci subsister : or, on sait que, en règle générale, les traces des lignes de glissement sont effacées par une attaque, sauf s'il y a précipitation le long des lignes de glissement.

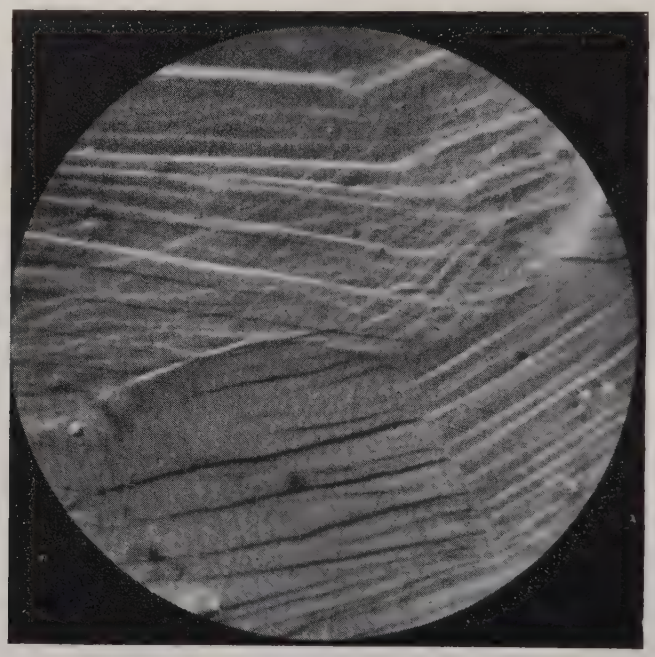


FIG. 47. — Contraste interférentiel sans attaque.
Examen après 150 tours. G. 850.

Au contraire, les macles sont surtout visibles après attaque. On peut donc penser que l'on est maintenant en présence de macles. Ainsi, le frottement peut produire successivement des glissements et des macles dans les couches sous-jacentes aux surfaces de contact.

Essai de mesure des températures au cours du mouvement.

Comme nous l'avons dit au chapitre II, un montage particulier a été réalisé pour permettre, grâce à un thermocouple, la mesure de la température en un point des deux galets au cours du mouvement.

La soudure du thermocouple étant placée à 2 mm de la surface de frottement, les températures mesurées ont atteint 300° C et ont dépassé cette valeur. Mais au-delà, comme nous l'avons dit, les mesures ne sont plus possibles.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Bien que notre étude se soit efforcée d'être limitée, elle s'est révélée complexe du fait du grand nombre de paramètres que les questions de frottement font intervenir. Nous avons été amené à distinguer les relations entre les propriétés de frottement et, d'une part, la structure superficielle du métal frottant, d'autre part, la structure des couches sous-jacentes.

L'association d'une couche superficielle dure à une matrice malléable la supportant a donné un comportement favorable au frottement.

En ce qui concerne la structure superficielle, on a distingué le relief microgéométrique des surfaces et leur état physico-chimique. Le relief microgéométrique, caractérisé par R_a, hauteur moyenne des irrégularités de niveau, intervient principalement lorsque l'on est en présence du lubrifiant.

Au cours du frottement lubrifié, les surfaces ont généralement tendance à se polir, c'est-à-dire que R_a a tendance à décroître. Il y a intérêt à ce que R_a se stabilise à une valeur qui ne soit pas trop faible, sinon apparaissent des risques de grippage.

C'est ce qu'on a vérifié en comparant l'évolution de R_a pour les surfaces traitées qui ne grippent pas et les surfaces non traitées qui grippent.

L'état physico-chimique des surfaces est surtout en relation avec les propriétés de frottement à sec. C'est ce qui est apparu dans le cas des surfaces traitées où le grippage ne se produit dans les conditions les plus sévères qu'au bout d'un certain délai. Cet état physicochimique peut être modifié lorsqu'on fait varier la vitesse de glissement et la charge appliquée. Il résulte une variation du coefficient de frottement où peut intervenir l'oxydation, comme l'a montré un examen des surfaces par diffraction électronique.

Il n'est pas apparu de relation entre le coefficient de frottement et l'usure : ces deux quantités apparaissent comme reliées à des propriétés distinctes du métal.

En ce qui concerne les couches sous-jacentes à la surface, leur structure est différemment affectée suivant le type de mouvement et également suivant que les surfaces frottent avec ou sans lubrifiant.

Avec lubrifiant et dans le cas où il y a roulement, on observe un écrouissage visible qui est maximal à une certaine distance de la surface de frottement. A cette distance, la dureté est également maximale. Lorsqu'il y a glissement au contraire, glissement qui a pu être réalisé sans que les surfaces grippent dans le cas seulement où les éprouvettes étaient traitées, l'écrouissage visible est relativement faible et la dureté va constamment en décroissant depuis la surface de frottement. La répartition des contraintes est donc différente suivant le type de mouvement.

Pour le même type de mouvement, le comportement des couches traitées et des couches non traitées est différent, les couches traitées présentant une structure plus résistante à l'écrouissage.

Enfin, dans le cas des couches traitées, la déformation des plaquettes de nitrures précipités permet de rendre compte des déformations du métal.

Dans le cas du frottement sec, des conditions de frottement différentes ont donné également lieu à des modifications différentes du métal.

Lorsque le roulement intervient, le métal s'écrouit sur une certaine profondeur, cet écrouissage allant en décroissant de la surface à l'intérieur de l'échantillon. Lorsqu'il y a seulement glissement, il faut des charges beaucoup plus élevées pour produire l'écrouissage ; on peut alors observer également la formation de lignes de glissements et de macles produites dans des conditions jusqu'à présent non connues.

Ainsi, les déformations apparaissent étroitement reliées à la nature du mouvement et du frottement.

Manuscrit reçu en mars 1960.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Groff (J.). — A. B. C. du graissage. *Ed. Technip*, 1951-1954.

(2) Courtel (R.) et Larbre (J.). — Contribution à l'étude de certains aspects de la lubrification. Sept. 1958, Bruxelles.

(3) Trillat (J. J.). — Adsorption moléculaire et états de surface en lubrification. *Bulletin de l'A. F. T. P.*, 1er juin 1948, 69.

(4) Bowden (F. P.) et Tabor. — The friction and lubrication of solids. *Oxford Press*, 1953.

(5) Woog (P.). — Contribution à l'étude du graissage. Onctuosité. Influences moléculaires. *Lb. Delagrave*, 1926.

(6) Beeching (R.) et Nicholls (W.). — *Proc. I. M. E.*, 1948, **158**, 317.

(7) Crook (A. W.). — *Proc. I. M. E.*, 1957, **171**, nº 5.

(8) Welsh (N. C.). — *I. M. E. conf. on lubrication and wear*, 1-3 oct. 1957.

(9) Pomey (J.). — *Revue Inst. Franç. du Pétrole*, juin 1957, **XII**, 6, 753.

(10) Pons (L.). — *C. R. Ac. Sc.*, 1959, **248**, 188.

(11) Buckle (H.). — *Revue de Métallurgie*, 1951, 12, 957.

(12) Buckle (H.). — *Metallurgical Reviews*, 1959, **4**, 13, 49.

(13) Courtel (R.), Buckle (H.) et Sebilleau (F.). — *C. R. Ac. Sc.*, 1954, 238, 873.

(14) Buckle (H.). — *O. N. E. R. A.* — *O. M.* 20.3. 1953.
Buckle (H.) et Buckle (Ch.). — *O. N. E. R. A.* — *O. M.* 8.7.1955.

(15) Collari (N.) et Virdis (P.). — *La Metallurgia Italiana*, 1957, 3, 150-169.

(16) Villemeur (Y. de). — *Métaux et Corrosion*, juin 1957, 32, 249.

(17) Desbrandes (R.). — Étude morphologique des couches traitées par le procédé de « sulfinusation ». *Thèse C. N. A. M.*, 1959.

(18) Buckle (Ch.), Courtel (R.), Desbrandes (R.) et Pons (L.). — *C. R. Ac. Sc.*, 1957, **245**, 1120.

(19) Morel (F.). — *C. R. Ac. Sc.*, 1952, **235**, 284.

(20) Popoff (A.). — Épreuves d'usure sur éprouvettes sulfinusées, *O. N. E. R. A., Direction des Matériaux*, non publié, avr. 1953.

(21) Pons (L.). — *C. R. Ac. Sc.*, 1958, **246**, 2731.

(22) Cazaud (R.). — Contribution à l'étude de quelques facteurs de la fatigue des aciers. *Journées d'Automne, S. F. M.*, Paris, 1957.

(23) *Brevet S. A. T. S.*, nº 942, 287, 19 févr. 1947.

(24) Nadeinskaya (E. P.). — *Stanki i instrument*, 1955, **26**, 2, 11-17.

(25) Maratray (F.). — *Publications de l'I. R. S. I. D.*, mars 1954, série B, nº 25.

(26) Pons (L.). — *Mémoires scientifiques de la Revue de Métallurgie*, 1959, **2**, 198.

(27) Mehl (R. F.), Barrett (C. S.) et Jesabek (H. S.). — *Trans. A. I. M. E.*, 1934, 113, 211.

(28) Hull (D.) et Garwood (R. D.). — The Mechanism of Phase Transformation in Metal. *Institute of Metals. Monographs and Report Series*, 1956, 18, 225.

(29) Bellanger (G.). — *Revue Inst. Franç. du Pétrole*, oct. 1958, **XIII**, 1481.

(30) Sander (B.). — *Innsbruck Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 1936, **48**, 27-139.

(31) Barrett (C. S.). — Structure des Métaux, *Dunod*, 1957.

(32) Paxton (H. W.). — *Acta metallurgica*, **1**, 141, 1953.

(33) Jaoul (B.). — Communication privée.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

LE ZIRCONIUM : PRÉPARATION ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DU MÉTAL PUR

Vu et approuvé :

Paris, le 11 mars 1960

Le Doyen
de la Faculté des Sciences,

J. PÉRÈS

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie
de Paris,

J. SARRAILH

IMPRIMERIE PROTAT FRÈRES, MACON. NOVEMBRE 1960 — DÉPOT LÉGAL 4e TRIMESTRE 1960
N° D'ORDRE CHEZ L'IMPRIMEUR : 7030 — N° D'ORDRE CHEZ L'ÉDITEUR : 244